

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Impacto na Fiabilidade do Sistema de Produção da Interligação
de Parques Eólicos na Rede

Joana Santiago Pereira de Almeida

Licenciada em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores
(Área de especialização Energias Renováveis)

Dissertação realizada sob a supervisão do
Professor Doutor Fernando Maciel Barbosa
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Fevereiro de 2008

Resumo

O incremento de produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis levou à necessidade de estudar e desenvolver novas formas de exploração dos sistemas eléctricos. Na avaliação da fiabilidade dos sistemas é de extrema importância a consideração da influência das características de intermitência da produção distribuída, típicas das energias renováveis, como é o caso da energia eólica.

Esta dissertação estuda e avalia o impacto da fiabilidade de um parque eólico português no sistema eléctrico representado por um diagrama de Markov construído com base num modelo de cálculo desenvolvido. O modelo combina as características estocásticas do parque eólico em estudo com as do recurso eólico disponível. Os índices de fiabilidade e desempenho do parque eólico em estudo são calculados segundo o diagrama de Markov criado, no qual as taxas de transição entre estados são caracterizadas pelas taxas de avaria e reparação dos aerogeradores e pelas taxas de transição entre os estados de vento definidos, que determinam o comportamento do vento. Os resultados apresentam o modelo do parque eólico usado no estudo e a sua aplicação para avaliar e estimar a probabilidade de produção associada aos diversos índices de fiabilidade calculados.

Palavras chave: fiabilidade, energia eólica, parques eólicos, fiabilidade de parques eólicos.

Abstract

The significant increase of production of energy from renewable sources led to the necessity of developing new ways of looking at the power systems. The evaluation of the intermittent of the renewable generation, which characterizes some of the renewable sources, as is the case of the wind power, becomes more important to assess its impact on the generation reliability of power systems.

This thesis studies and analyzes the reliability impact of a Portuguese wind farm in the power system using a computer model which represents the Portuguese wind farm by a Markov process. The probabilistic model combines the stochastic characteristics of wind speed with the characteristics of the wind turbines. The transition between the operative and failed states of the wind turbines, characterized by failure and repair rates, are combined with the wind behaviour to make possible the calculation of some performance indexes used on the analysis of the wind power output expectation of the Portuguese wind farm. Some results obtained with the model applied to a Portuguese wind farm are presented in this thesis. The results show the modelling of the wind farm in reliability studies and the use of the model to evaluate the generation states and their probabilities, allied to several reliability indexes.

Key words: reliability, wind energy, wind farms, wind farms reliability.

Résumé

L'évolution très significatif de la production d'énergie à partir de sources renouvelables a conduit à la nécessité de développer de nouveaux moyens d'exploration des systèmes électriques. L'évaluation de l'intermittence de l'énergie renouvelable, qui est caractéristique de certaines sources d'énergie renouvelables, comme l'énergie éolique, devient de plus en plus important d'évaluer son impact sur la fiabilité de la production des systèmes électriques.

Cette thèse analyse les études de fiabilité et le l'impact d'un parc éolique portugais dans le système électrique en utilisant un modèle informatique qui représente le parc éolique portugais par un diagramme de Markov. Le modèle probabiliste combine les caractéristiques stochastiques de la vitesse du vent avec les caractéristiques des turbines éolique. La transition entre les états de fonctionnement et les états de panne des turbines éolique, caractérisée par le taux de panne et le taux de réparation, sont combinées avec le comportement du vent ce qui vend possible le calcul de certains indices de performance utilisés sur l'analyse de la production d'énergie éolique expectée dans le parc éolique portugais. Certains résultats obtenus avec le modèle appliqué à un parc éolique portugais sont présentés dans cette thèse. Les résultats exhibent la modélisation du parc éolique dans les études de fiabilité et de l'utilisation du modèle pour évaluer la production de chaque état et leurs probabilités, associés à plusieurs indices de fiabilité.

Mots clé: fiabilité, énergie éolique, parc éolique, fiabilité des parcs éolique.

Agradecimentos

Pretendo agradecer a todos aqueles que, nos últimos dois anos, de alguma forma contribuíram para a elaboração desta dissertação e para a minha formação académica, profissional e pessoal.

Em primeiro lugar, quero salientar o meu apreço e agradecimento ao Professor Doutor F. Maciel Barbosa, pela forma como me orientou e pelo seu contributo, que foi imprescindível para o resultado final que é apresentado neste documento.

Agradeço ao Professor Doutor Álvaro Rodrigues e à sua equipa do INEGI, nomeadamente ao Eng. José Matos e à Eng. Filipa Magalhães, que me auxiliaram na construção do caso de estudo apresentado. Quero agradecer ao Eng. Mário Silva e ao Eng. Henrique Oliveira pela ajuda e disponibilidade prestadas. Agradeço, também, aos meus revisores de texto, a Celeste Pereira e o Michel Kabalan. Sem diferenciar nomes, com receio de me esquecer de alguém importante, agradeço aos meus colegas, amigos, professores, à família Gomes, à família Pereira e por último, mas de forma alguma menos importantes, à minha família, que, embora dispersa no espaço, esteve sempre presente, e, ao meu melhor amigo, o Zé.

A todos eles, sem qualquer distinção: Muito obrigada!

Índice

RESUMO.....	3
ABSTRACT	5
RESUME	7
AGRADECIMENTOS	9
ÍNDICE	11
ÍNDICE DE FIGURAS	15
ÍNDICE DE TABELAS	17
CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. INTRODUÇÃO	19
1.2. SITUAÇÃO ENERGÉTICA DE PORTUGAL	21
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
CAPÍTULO II. A ENERGIA EÓLICA	23
2.1. AS ENERGIAS RENOVÁVEIS	23
2.2. A ENERGIA EÓLICA	25
2.2.1. O COMPORTAMENTO DO VENTO	26
2.2.2. A AERODINÂMICA	28
2.2.2.1. FORÇAS ACTUANTES NA PÁ	30
2.2.2.2. EFEITO DE ESTEIRA	30
2.2.3. O AEROGERADOR	31
2.2.3.1. A TECNOLOGIA.....	31
2.2.3.1.1.O ROTOR	32
2.2.3.1.2.O GERADOR.....	33
2.2.3.1.3.A CABINA	34
2.2.3.1.4.A TORRE.....	35
2.3. A ENERGIA EÓLICA NO MUNDO	35
2.3.1. INCENTIVOS À UTILIZAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA.....	39
2.3.1.1. ALEMANHA	40
2.3.1.2. ESPANHA.....	41
2.3.1.3. ITÁLIA	42
2.3.1.4. REINO UNIDO	42
2.3.1.5. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA – EUA	43
2.3.1.6. CANADÁ	44
2.3.1.7. BRASIL	45

2.3.1.8. ÍNDIA	46
2.3.1.9. JAPÃO	47
2.3.1.10. AUSTRÁLIA	48
2.4. A ENERGIA EÓLICA EM PORTUGAL	48
2.4.1. PRODUÇÃO EM PORTUGAL	50
2.5. A INTEGRAÇÃO DA PRODUÇÃO EÓLICA NOS SISTEMAS ELÉCTRICOS	50
2.5.1. IMPACTOS PREVISÍVEIS NAS REDES	53
2.5.1.1. RESISTÊNCIA A CAVAS DE TENSÃO - <i>RIDE THROUGH DEFAULTS</i>	53
2.5.1.2. RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	54
2.5.1.3. POTÊNCIA REACTIVA	54
2.5.1.4. ARRANQUE EM REDE ISOLADA – <i>BLACK START</i>	54
2.6. RESUMO	55
CAPÍTULO III. A FIABILIDADE DE SISTEMAS ELÉCTRICOS	57
3.1. INTRODUÇÃO	57
3.2. CONCEITOS BÁSICOS	57
3.3. FIABILIDADE DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO	61
3.4. PROCESSOS DE MARKOV	63
3.5. ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO DE FIABILIDADE	68
3.6. RESUMO	69
CAPÍTULO IV. O PROGRAMA DESENVOLVIDO	71
4.1. O ALGORITMO	71
4.2. MODELIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO AEROGERADOR	71
4.3. MODELIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO RECURSO EÓLICO	73
4.3.1. DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE VENTO E CÁLCULO DAS RESPECTIVAS TAXAS DE TRANSIÇÃO ..	75
4.4. MODELIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS AEROGERADORES E DO RECURSO EÓLICO	76
4.5. O PROGRAMA	79
4.6. CASO DE ESTUDO	81
4.6.1. APRESENTAÇÃO	81
4.6.2. O CÁLCULO	83
4.6.3. OS RESULTADOS	88
4.7. RESUMO	93
CAPÍTULO V. CONCLUSÕES	95
5.1. OBJECTIVOS ATINGIDOS	95
5.2. PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO	97
6. REFERÊNCIAS <i>ON LINE</i>	99
7. REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA	100
ANEXO 1. CASO 1 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS	103
ANEXO 2. CASO 2 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS	104



ANEXO 3.	CASO 3 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS	105
ANEXO 4.	CASO 4 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS	106
ANEXO 5.	CASO 5 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS	107
ANEXO 6.	CASO 6 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS	108
ANEXO 7.	CASO 7 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS	109
ANEXO 8.	CASO 8 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS	110
ANEXO 9.	CASO 9 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS	111
ANEXO 10.	CASO 10 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	112
ANEXO 11.	CASO 11 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	113
ANEXO 12.	CASO 12 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	114
ANEXO 13.	CASO 13 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	115

Índice de figuras

Figura II-1: Relação entre o diâmetro típico do rotor e a potência do aerogerador [I.3].	24
Figura II-2: Atlas Europeu de Vento [I.14].	27
Figura II-3: Tubo de Betz: Velocidade do vento antes de passar pela turbina eólica, v_1 e após passar pela turbina, v_2 [I.3].	28
Figura II-4: Albert Betz.	28
Figura II-5: Limite de Betz.	29
Figura II-6: Representação das forças actuantes na pá da turbina eólica [13].	30
Figura II-7: Esquema típico de um aerogerador [13].	32
Figura II-8: Máquinas síncronas e assíncronas usadas em aerogeradores [19].	34
Figura II-9: Capacidade instalada anualmente por continente [10].	35
Figura II-10: Potência eólica instalada total – Top 10 [10].	37
Figura II-11: Nova potência eólica instalada – Top 10 [10].	37
Figura II-12: Potência eólica projectada para instalar no Mundo entre 2007 e 2010 [10].	39
Figura II-13: Evolução da potência eólica instalada em Espanha [10].	41
Figura II-14: Parque eólico no Canadá.	45
Figura II-15: Parque eólico na Índia.	46
Figura II-16: Parque eólico no Japão.	47
Figura II-17: Evolução da Energia Eólica em Portugal [34].	50
Figura II-18: Defeito na rede - “ <i>defaults</i> ”- [2].	51
Figura II-19: Curvas de probabilidade acumulada de um parque eólico sobre-dimensionado e não sobre-dimensionado [32].	52
Figura III-1: Cadeia de Markov.	64
Figura III-2: Diagrama de Markov de um componente eléctrico.	66
Figura IV-1: Diagrama de Markov de um sistema com dois geradores iguais.	72
Figura IV-2: Diagrama de Markov que modeliza as variações do recurso eólico.	76
Figura IV-3: Diagrama de Markov que modeliza os aerogeradores e as variações do recurso eólico.	78
Figura IV-4: Fluxograma do programa.	80
Figura IV-5: Aerogerador MM82.	81
Figura IV-6: Curva de potência do aerogerador MM82.	81
Figura IV-7: Curva de vento – valores registados entre 1 de Janeiro e 31 de Julho de 2005.	82
Figura IV-8: Curva de vento – valores registados entre 31 de Julho e 31 de Dezembro de 2005.	82
Figura IV-9: Curva de vento – valores registados entre 1 de Janeiro e 31 de Julho de 2006.	82
Figura IV-10: Curva de vento – valores registados entre 31 de Julho e 31 de Dezembro de 2006.	82

Figura IV-11: Curva de probabilidade acumulada e distribuição de Weibull do parque eólico em estudo – ano 2006.	83
Figura IV-12: Curva de vento das 00h00 às 8h00 do dia 1 de Janeiro de 2006 registada no parque eólico em estudo.	84
Figura IV-13: Curva de vento das 00h00 às 24h00 do dia 1 de Janeiro de 2006 registada no parque eólico em estudo.	85
Figura IV-14: Patamares de vento calculados para modelizar a curva de vento de 2006 em diferentes números de estados pretendidos.	85
Figura IV-15: Patamares de vento calculados para modelizar a curva de vento de 2005 em diferentes números de estados pretendidos.	86
Figura IV-16: Curvas de potência obtidas para 10, 25, 100 e 200 estados de vento.	87
Figura IV-17: Curva de vento das 00h00 às 8h00 do dia 1 de Janeiro de 2006 registada no parque eólico em estudo.	87
Figura IV-18: Curva de potência considerando 50 estados de vento.	88
Figura IV-19: Índices de fiabilidade obtidos para o estudo do ano de 2006.	92
Figura IV-20: Índices de fiabilidade obtidos para o estudo do ano de 2005.	93

Índice de tabelas

Tabela II-1: Potência eólica instalada no Mundo [10].	38
Tabela II-2: Evolução da energia eólica no Canadá [10].	44
Tabela II-3: Evolução da energia eólica na Índia [10].	46
Tabela II-4: Evolução da energia eólica na Austrália [10].	48
Tabela IV-1: Resultados obtidos para o estudo de fiabilidade durante do ano de 2006.	88
Tabela IV-2: Resultados obtidos para o estudo durante do ano de 2006.	90
Tabela IV-3: Resultados obtidos para o estudo durante do ano de 2005.	91
Tabela IV-4: Resultados obtidos para o estudo durante do ano de 2005.	91

Capítulo I. Introdução

1.1. Introdução

A energia desempenha um papel fundamental em todas as actividades. Tem, contudo, um papel preponderante nas actividades económicas, e no seu desenvolvimento.

O desenvolvimento sócio-económico das últimas décadas caracterizou-se por um forte crescimento do consumo de energia produzida essencialmente a partir de combustíveis fósseis.

O aumento do consumo de petróleo que ocorreu na indústria na década de 70, associado ao seu constante aumento de preço, tornou a energia num importante factor de produção.

A produção de energia primária no mundo verificou um aumento de cerca de 2% ao ano entre 1974 e 1992, sendo o petróleo o combustível mais importante seguido pelos combustíveis sólidos, o gás natural, as energias renováveis e por último a energia nuclear.

Em Outubro de 1973, Anwar Sadat, Presidente Egípcio, lançou uma ofensiva militar contra Israel que desencadeou o primeiro choque petrolífero. A OPEP diminuiu a produção de petróleo criando o caos no Ocidente devido à escassez de combustível, com a inevitável escalada dos preços no mercado.

Menos de seis anos depois, a crise política no Irão afectou novamente os mercados internacionais devido à diminuição da produção iraniana.

Os choques petrolíferos ocorridos nos anos 70 e, posteriormente, as situações semelhantes ocorridas nos anos 80 impuseram a necessidade de alterar o modelo de desenvolvimento, o modo de encarar a energia como factor de produção bem como de questionar a forma de exploração dos recursos naturais do nosso Planeta.

Em 1997, no Japão, foi assinado o Protocolo de Quioto, com o objectivo de reduzir as emissões de gases poluentes para a atmosfera. As metas definidas neste protocolo deverão ser atingidas entre 2008 e 2012, de forma a que as emissões de gases com efeitos de estufa, que são responsáveis pelo aumento do aquecimento global do Planeta, sejam reduzidas em 5% em relação aos níveis de 1990.

Em 1987, Gro Harlem Brundtland, Primeira-Ministra da Noruega, que presidia a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento da Organização das

Nações Unidas – ONU –, definiu o conceito de Desenvolvimento Sustentável no relatório intitulado *Our Common Future* como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades”. É a procura do melhor para um resultado tecnicamente superior que contribua para um ambiente saudável para o homem tanto nos espaços abertos como confinados. Implica atingir os objectivos/metastas com um menor consumo possível de matérias e de energia analisando as consequências das intervenções na saúde das pessoas, na equidade e nos sistemas de valores regionais e locais.

É necessário compreender a relação entre o Homem e meio ambiente e os limites de utilização dos recursos naturais existentes e tomar medidas para promover o desenvolvimento sustentável.

Novos rumos têm que ser encontrados e estes passam pela gestão dos recursos de energia para o desenvolvimento sustentável das sociedades.

A energia eólica surge, nos últimos anos, como uma das fontes de energia alternativa com maior viabilidade de exploração.

Em toda a Europa foram criados mecanismos e políticas de incentivo à exploração do recurso eólico, assegurando a compra da energia eléctrica produzida proveniente desta fonte alternativa aliada a boas remunerações económicas. A Alemanha e a Dinamarca forma pioneiras neste processo desencadeando progressivamente o interesse de diversos países. O rápido avanço tecnológico registado nos últimos anos tem reduzido o custo de utilização desta fonte de energia, abrindo portas ao investimento de uma forma mais favorável.

Actualmente, a produção eólica é considerada uma fonte de energia menos fiável do que as convencionais centrais térmicas, uma vez que o recurso disponível pode variar muito ao longo do ano e mesmo ao longo do dia e o seu uso está confinado a locais onde se verifiquem ventos fortes e relativamente constantes. Assim, quando se pretende fazer um investimento num parque eólico é necessário avaliar o recurso disponível, avaliando as velocidades e direcções dos ventos predominantes e a intermitência dos mesmos. O comportamento da produção eólica, nomeadamente a sua intermitência, terá que ser ponderada no planeamento e operação do sistema eléctrico.

O crescente número de parques eólicos ligados à rede fomentou a necessidade de se estudar os seus efeitos e influência nos sistemas eléctricos. Por isso têm vindo a ser desenvolvidos métodos de previsão de vento e métodos que permitam avaliar e

estimar a capacidade de energia que um aerogerador pode disponibilizar. É assim, necessário avaliar e estimar a fiabilidade da produção eólica e a sua influência no sistema eléctrico em que esta se integra.

As principais questões que hoje se colocam são a garantia de fornecimento das cargas por parte do sistema eléctrico, o aumento da eficiência energética do sistema e a sua competitividade, devendo o estudo da interligação de parques eólicos na rede ser feito tendo em conta estes aspectos.

1.2. Situação energética de Portugal

Portugal é desprovido de recurso naturais, pelo que tem uma grande dependência externa, importa cerca de 85% de toda a energia que consome. A produção de energia primária em Portugal engloba carvão, electricidade (obtida por fontes de energia hídrica, geotérmica, eólica e térmica), lenhas e resíduos.

Da energia importada mais de 85% é fóssil e mais de 60% da electricidade provém de combustíveis fósseis a rendimentos médios de 40%.

O consumo de energia per capita em Portugal é cerca de metade da média europeia, dados da Direcção Geral de Geologia e Energia. Verifica-se contudo que o rácio do consumo de energia pelo produto interno bruto PIB é bastante elevado.

É absolutamente necessário maximizar a autonomia energética, mas também reduzir os riscos que lhe estejam associados, o que implica designadamente o equilíbrio e a diversificação das várias fontes de abastecimento.

A criação de incentivos ao rápido desenvolvimento da produção de electricidade por vias progressivamente mais limpas (co-geração, microgeração, ciclo combinado) e a partir de fontes renováveis, incluindo a grande hídrica, é, portanto, um factor crucial.

Torna-se necessário e fundamental agilizar procedimentos administrativos para criar o planeamento energético nacional que estabeleça as prioridades.

No ano de 2005, tendo em conta as novas dificuldades e desafios impostos no desenvolvimento do País, no Conselho de Ministros RCM nº 169/2005 o Governo estabeleceu uma estratégia nacional para a energia, que tem como principais objectivos:

1. Garantir a segurança do abastecimento da energia, através da diversificação dos recursos primários e dos serviços energéticos assim como da promoção da eficiência energética na cadeia da oferta e na procura de energia.

2. Estimular e favorecer a concorrência, de forma a promover a defesa dos consumidores, bem como a competitividade e a eficiência das empresas, quer as do sector da energia quer nos demais do tecido empresarial.
3. Garantir a adequação ambiental de todo o processo energético, reduzindo os impactes ambientais às escalas local, regional e global, nomeadamente no que respeita à intensidade carbónica no PIB.

1.3. Estrutura da dissertação

O objectivo desta dissertação é análise do impacto na fiabilidade do sistema de produção da interligação de parques eólicos na rede.

A dissertação está dividida em 5 capítulos.

O primeiro capítulo faz a introdução e apresenta os objectivos da dissertação.

No segundo capítulo são apresentados conceitos teóricos relacionados com a caracterização do recurso eólico e respectiva tecnologia. Será, também, demonstrada a importância e apresentado o “estado da arte” das energias renováveis em diversos países do Mundo, em particular o desenvolvimento dos parques eólicos.

O terceiro capítulo é dedicado à análise da fiabilidade de sistemas produtores constituídos por geradores eólicos.

No capítulo seguinte, o quarto, é apresentado o modelo computacional desenvolvido para o estudo da fiabilidade de um sistema produtor com parques eólicos.

Finalmente, o quinto capítulo, é dedicado à apresentação das conclusões resultantes do trabalho realizado bem como à indicação das perspectivas de trabalho futuro a realizar.

Capítulo II. A Energia Eólica

2.1. As Energias Renováveis

Actualmente, a energia eléctrica é um bem indispensável à vida de todos os cidadãos, e ao desenvolvimento, das sociedades industrializadas.

Sendo a energia eléctrica indispensável em todas as actividades assim como no bem estar dos cidadãos, assume um papel de grande responsabilidade, obrigando as empresas ligadas ao sector a fornecerem os seus clientes, particulares e industriais, de acordo com determinados padrões de qualidade e continuidade de serviço.

O incremento no consumo de energia a nível mundial, principalmente devido ao rápido desenvolvimento tecnológico da China, Índia e outros países, tem criado a necessidade de utilizar novas fontes de energia.

Na Europa o aumento de consumo de energia previsto será de 51% entre 2000 e 2030 (em todo o Mundo será de 60% até 2030) o que colocará em questão a segurança do abastecimento e requererá um investimento na produção de energia na ordem dos 625 biliões de euros [3].

A instabilidade politico-social vivida nos principais países de onde é oriundo o petróleo e o gás assim como a necessidade de diminuir a emissão de gases de efeito de estufa para controlar as alterações climáticas sentidas no nosso Planeta são factores que desencadearam o desenvolvimento das tecnologias para produção de energia a partir de energias renováveis.

O desenvolvimento tecnológico e a maturação da tecnologia para produção de energia a partir do recurso eólico começou nos anos 80 e continua nos dias de hoje. O desenvolvimento dos aerogeradores e sistemas de controlo dos últimos tempos possibilitou que, actualmente, a produção eólica possa ser vista como uma forma viável e rentável de produção de energia.

As torres eólicas dos dias de hoje, são consideravelmente maiores do que as que existiam nos anos 80 para além de serem mais robustas, sofisticadas e eficientes.

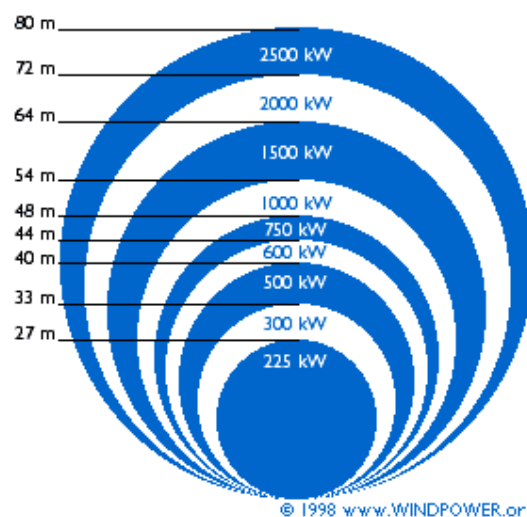


Figura II-1: Relação entre o diâmetro típico do rotor e a potência do aerogerador [I.3].

A energia eólica apresenta-se actualmente como a maior fonte de energia em crescimento no Mundo, como uma taxa média de crescimento anual na ordem dos 26% desde 1990.

As energias renováveis, como o caso da energia eólica, solar e das ondas, caracterizam-se pela intermitência do recurso, ou seja, não se encontram disponíveis na natureza em qualquer intervalo de tempo.

As incertezas associadas ao recurso primário causam impactos na gestão do sistema eléctrico, nomeadamente ao nível da operação dos mercados de energia, na avaliação das condições de exploração da rede, na definição dos níveis de reserva do sistema... Surgem também problemas de segurança de abastecimento do sistema.

Nos últimos tempos várias iniciativas políticas e de opinião pública impulsionaram as energias renováveis, nomeadamente a energia eólica.

A produção eólica, apesar de ainda não apresentar valores competitivos quando comparada com a produção a partir de fontes de energia convencionais, tem sido alvo do avanço tecnológico, melhorando a sua performance e reduzindo os seus custos de produção. O potencial de investigação e desenvolvimento encontra-se em diversas áreas, tais como, a aerodinâmica, o controlo, a previsão e o aumento das potências unitárias.

No entanto, devido à intermitência associada ao recurso eólico, a energia eólica é considerada menos fiável visto que a sua produção pode variar durante o dia, o mês, a estação, e o ano.

A avaliação de um local para a implementação de um parque eólico passa sobretudo pela avaliação do recurso.

Assim, é crucial o uso de métodos de previsão de vento.

As principais questões que surgem actualmente no sistema eléctrico incluem a garantia da segurança no abastecimento, o aumento da eficiência energética e o aumento da competitividade.

2.2. A energia eólica

A energia eólica é uma fonte de energia com origem na energia solar, visto que resulta do aquecimento irregular da superfície terrestre. O ar nas regiões próximas do equador é mais quente e por isso tende a subir na direcção dos pólos. Em conjunto com o movimento de rotação da Terra surgem correntes de ar quentes e frias segundo a força de Coriolis com um desvio para a direita na direcção norte sul e para a esquerda na direcção sul norte. As massas de ar em movimento resultantes destes fenómenos são denominadas de ventos geostróficos.

O vento é influenciado pelas condições climáticas, pelas características do relevo e pelos obstáculos presentes.

Durante o dia as massas de ar presentes no solo são mais aquecidas pelo Sol do que as massas presentes no oceano o que explica a ocorrência de deslocamentos de ar do interior para a costa e no sentido contrário durante a noite. Assim, a velocidade do vento é dependente da diferença de temperatura entre a terra e o oceano variando entre o dia e a noite e ao longo das estações do ano.

A fricção da massa de ar em movimento na superfície da terra também influencia o vento e por isso é necessário caracterizar devidamente os possíveis locais de implantação de parques eólicos em relação ao seu relevo, à rugosidade apresentada e aos obstáculos existentes.

O vento apresenta uma variação vertical que tende a diminuir quanto mais próximo estiver da superfície da terra devido à fricção provocada pela rugosidade do terreno.

A rugosidade é quantificada em 5 classes, correspondendo a classe 0 a um terreno livre de irregularidades e a classe 4 a um terreno com árvores e/ou construções.

Para além da rugosidade a velocidade do vento também é influenciada pela orografia do terreno. A presença de montanhas ou outro tipo de elevação provoca a aceleração

e mudança de direcção do vento. Entre elevações que formam uma garganta a velocidade do vento aumenta devido ao efeito de túnel.

Os obstáculos mais comuns em locais de implantação de parques eólicos são árvores, rochedos e construções. A redução da velocidade do vento devido à existência de obstáculos na direcção do vento predominante pode inviabilizar a construção do parque.

2.2.1. O comportamento do vento

Conhecer as variações do vento, diárias, sazonais e/ou anuais, é importante para o projecto e desenvolvimento dos aerogeradores.

As variações diárias são provocadas pelas mudanças climáticas ao longo do dia, pelo aquecimento não uniforme que provoca as brisas terrestre e marítima.

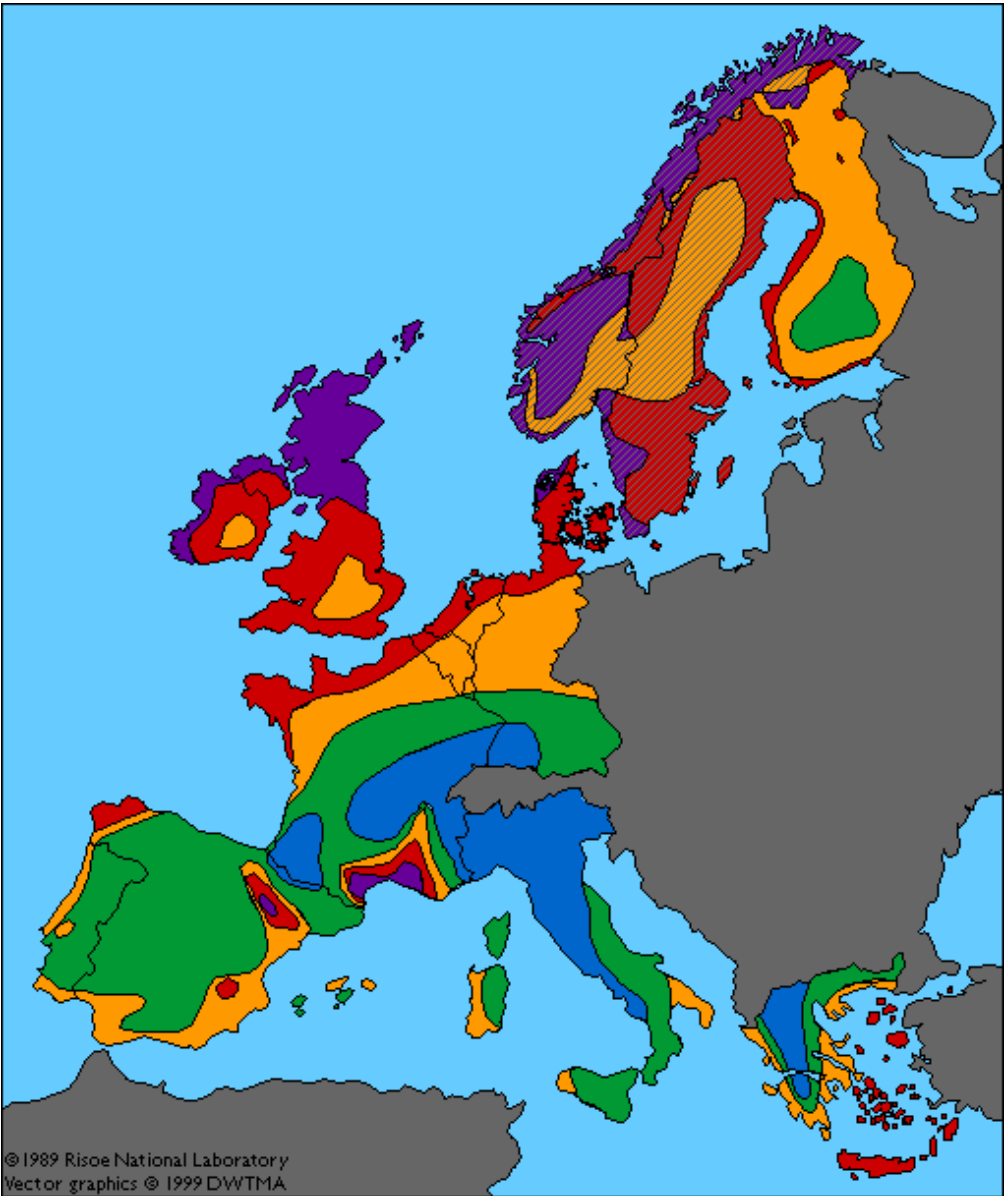
As variações sazonais são também provocadas pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre ao longo das quatro estações.

As variações diárias e sazonais são importantes para o cálculo da estimativa de produção eléctrica para o planeamento do sistema. Se os ventos dominantes ocorrerem a maioria das vezes durante o dia a produção eólica será importante para o abastecimento das cargas diárias, no entanto, se os ventos dominantes ocorrem principalmente durante a noite, quando a carga a alimentar é baixa, a produção eólica poderá não ser bem usufruída para alimentação de cargas e ser antes aproveitada para os processos de bombagem dos aproveitamentos hídricos.

A variação anual, com base em levantamentos de velocidade de vento ao longo de vários anos (no mínimo 1 ano!!) num dado local, são importantes para a avaliação da viabilidade económica da implementação de um parque eólico.

As turbulências e rajadas de vento provocam variações de curta duração. O estudo destas curtas variações é muito importante para a avaliação da estabilidade de produção bem como para a garantia da robustez necessária das máquinas a instalar num local com essas características.

Na Europa, em 1989, foi criado o Atlas Europeu do Vento com dados obtidos a partir de estações meteorológicas que foram tratados e extrapolados para outras áreas.



Recurso eólico disponível a 50 metros do solo									
Locais abrigados		Planícies		Costa marítima		Alto mar		Montanhas e cumes	
m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
>6,0	>250	>7,5	>500	>8,5	>700	>9,0	>800	>11,5	>1800
5,0 - 6,0	150 - 250	6,5 - 7,5	300 - 500	7,0 - 8,5	400 - 700	8,0 - 9,0	600 - 800	10,0 - 11,5	1200 - 1800
4,5 - 5,0	100 - 150	5,5 - 6,5	200 - 300	6,0 - 7,0	250 - 400	7,0 - 8,0	400 - 600	8,5 - 10,0	700 - 1200
3,5 - 4,5	50 - 100	4,5 - 5,5	100 - 200	5,0 - 6,0	150 - 250	5,5 - 7,0	200 - 400	7,0 - 8,5	400 - 700
<3,5	<50	<4,5	<100	<5,0	<150	<5,5	<200	<7,0	<400
		>7,5							
		5,5 - 7,5							
		<5,5							

Figura II-2: Atlas Europeu de Vento [I.14].

2.2.2. A aerodinâmica

O princípio de funcionamento da turbina de um aerogerador baseia-se no aproveitamento de parte da energia cinética associada ao movimento de uma dada massa de ar.

Na passagem do vento pelo rotor há um processo intermédio de conversão da energia cinética em pressão, acompanhando a diminuição gradual da velocidade imposta pela presença da turbina. Dá-se também uma queda brusca de pressão de tal forma que à saída o seu valor é mais baixo que a pressão do meio circundante.



Figura II-3: Tubo de Betz: Velocidade do vento antes de passar pela turbina eólica, v_1 e após passar pela turbina, v_2 [1.3].

A jusante do rotor a pressão cresce gradualmente até atingir de novo o valor da pressão atmosférica e a velocidade diminui segundo um processo de conversão idêntico ao que ocorre a montante da turbina. Assim, os valores de pressão estática entre dois pontos, um a

montante e outro a jusante do rotor, são iguais, verificando-se uma diminuição da energia cinética.

Quando ocorre o escoamento há uma redução da energia cinética. Para que toda a energia cinética fosse convertida seria necessário que a velocidade se anula-se a jusante do rotor de forma a parar o escoamento, não havendo mais transporte de energia.

A *Lei de Betz*, enunciada por Albert Betz em 1919, diz que, independentemente da forma construtiva da turbina, apenas 16/27, cerca de 59%, da energia cinética contida no vento pode ser transformada em energia mecânica.

A massa de ar que atravessa o rotor será:

$$m = \rho \cdot A \cdot \frac{v_2 + v_1}{2} = \rho \cdot A \cdot v_{agv} \quad (II-1)$$



Figura II-4: Albert Betz

A potência pode ser expressa como:

$$P = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{II-2})$$

$$\Leftrightarrow P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

$$\text{Sendo } P_0 = \frac{E_c}{t} \quad (\text{II-3})$$

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{d}{dt} (v_1^2) = P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3$$

A razão entre a potência extraída do vento e a potência disponível obtidas em condições ideais será:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} \quad (\text{II-4})$$

$$\Leftrightarrow \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{v_1 + v_2}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{v_1^3} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (\text{II-5})$$

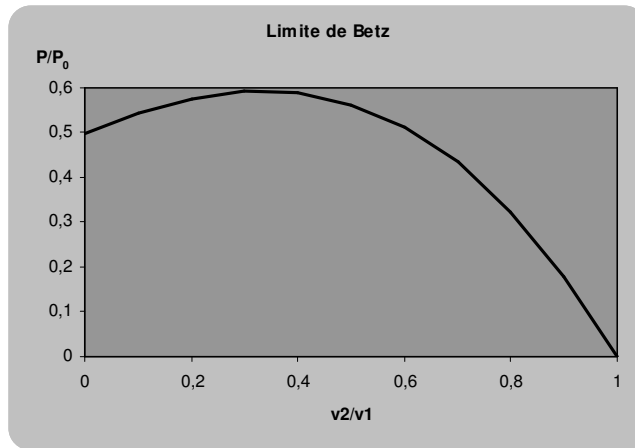


Figura II-5: Limite de Betz

Verifica-se assim que a energia cinética do vento convertida em energia mecânica na turbina eólica é 0,593, ou 16/27, da potência total disponível.

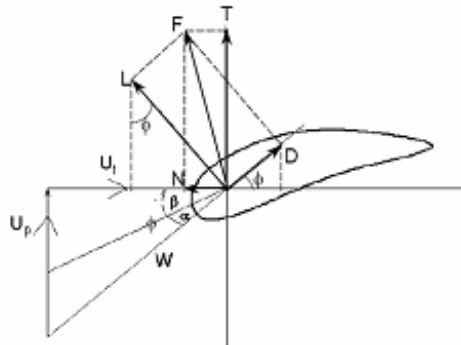
O coeficiente aerodinâmico do rotor, C_p , é a percentagem de energia cinética da massa de ar em movimento que incide no rotor que é convertida em

energia mecânica. Este coeficiente é dependente do ângulo de passo ("pitch angle") e da relação de velocidade da pá ("tip speed ratio") e apresenta um valor máximo teórico de 0,593, *limite de Betz*.

2.2.2.1. Forças actuantes na pá

O rotor da turbina eólica é constituído por pás cuja secção recta tem a forma de um perfil alar. A geometria das pás é um factor de extrema importância e que determina a quantidade de energia possível extrair da massa de ar que atravessa o rotor.

O desenvolvimento dos aerogeradores de forma a otimizar e maximizar a produção passa pelo estudo do sistema de forças que actua num perfil alar, figura II-6, que corresponde à forma da secção recta das pás do rotor.



Legenda:

- W – velocidade relativa do vento que actua na pá;
- U_p – velocidade do vento, componente de W ;
- U_t – velocidade tangencial da pá, componente de W ;
- α – ângulo de ataque;
- β – ângulo de passo;
- $\Phi = \alpha + \beta$ – ângulo de escoamento;
- $F = D + L$ – força;
- D – força de arrastamento;
- L – força de sustentação;
- $N = L \sin(\Phi) - D \cos(\Phi)$ – componente que contribui para o movimento da pá;
- $T = L \cos(\Phi) + D \sin(\Phi)$ – componente que contribui para o binário motor.

Figura II-6: Representação das forças actuantes na pá da turbina eólica [13].

2.2.2.2. Efeito de esteira

A zona a jusante do rotor de um aerogerador é altamente perturbada do ponto de vista aerodinâmico devido à diminuição da energia cinética e ao aumento de

turbulência. Este fenómeno tem implicações na eficiência bem como na vida útil dos equipamentos. Para evitar que esse efeito interfira na geração de energia convencionou-se que a distância mínima entre aerogeradores deve ser de 5 a 6 vezes o diâmetros do rotor, na direcção do vento dominante, e de 2,5 a 3 diâmetros de rotor, na direcção perpendicular.

2.2.3. O aerogerador

As turbinas eólicas são projectadas para gerarem a máxima potência a uma determinada velocidade de vento, tipicamente entre 12 a 15 m/s.

A energia disponível na coluna de ar em movimento, com velocidade uniforme e constante $u[m/s]$, que atravessa a secção plana transversal do rotor da turbina $A[m^2]$, desloca uma massa de ar $\rho \cdot A \cdot u[kg/s]$ em que ρ é a massa específica do ar e tem o valor de $1,225 \text{ kg/m}^3$.

A potência disponível no vento é proporcional ao cubo da velocidade do vento, dada pela expressão seguinte:

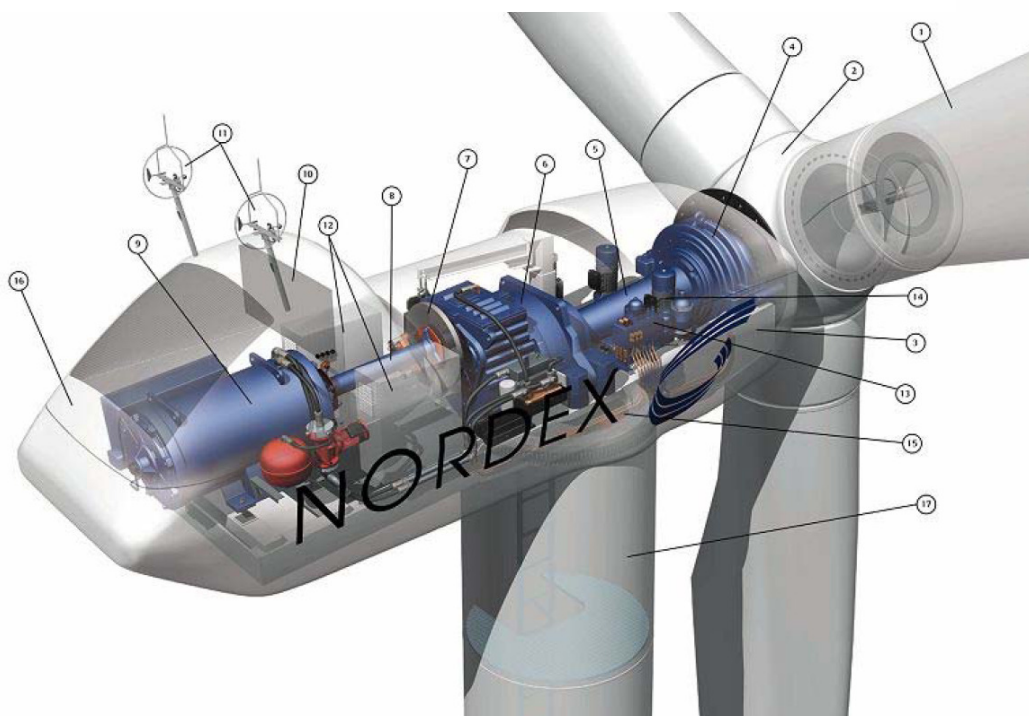
$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot A \cdot V_w^3 \quad (\text{II-6})$$

Assim, quando a velocidade do vento duplica a potência disponível aumenta oito vezes, enquanto que duplicando a área varrida pelas pás o aumento é apenas de duas vezes.

Ou seja, para haver um bom aproveitamento do recurso os aerogeradores devem ser colocados em locais com velocidade de vento elevadas que favoreçam o sucesso económico do projecto.

2.2.3.1. A tecnologia

Os principais componentes de um aerogerador eólico de eixo horizontal encontram-se representados na figura número II-7.



Legenda:

- 1 – pás do rotor;
- 2 – cubo do rotor;
- 3 – cabina;
- 4 – chumaceira do rotor;
- 5 – veio do rotor;
- 6 – caixa de velocidades;
- 7 – travão de disco;
- 8 – veio do gerador;
- 9 – gerador;
- 10 – radiador de arrefecimento;
- 11 – anemómetro e sensor de direcção;
- 12 – sistema de controlo;
- 13 – sistema hidráulico;
- 14 – mecanismo de orientação direcciona;
- 15 – chumaceira do mecanismo de orientação direcciona;
- 16 – cobertura da cabina;
- 17 – torre.

Figura II-7: Esquema típico de um aerogerador [13].

2.2.3.1.1. O rotor

A caracterização do rotor passa pela definição das características das pás que o constituem, pela determinação da sua forma e do ângulo de ataque em relação à direcção do vento. O rotor pode ser montado a montante ou a jusante da torre, em relação à superfície de ataque do vento, sendo mais comum a opção *upwind*, em que o vento ataca as pás pela frente. Nesta opção a torre não interfere no vento incidente. Ao contrário, a opção *downwind* tem perdido expressão nomeadamente pela sua perturbação nefasta do escoamento.

A solidez é definida pela razão entre a área total das pás e área varrida pelas pás. Considerando o diâmetro e a solidez constantes, o rendimento aumenta com o aumento do número de pás. A energia capturada ao vento cresce entre 3% a 5% quando se passa de duas para três pás mas este aumento torna-se cada vez mais ténue à medida que o número de pás aumenta. A maioria das turbinas apresenta uma solução de três pás. Esta solução será o resultado de estudos de optimização de benefícios, por exemplo da relação preço vs. peso.

A vida útil do rotor está dependente da vida útil dos seus componentes e dos esforços e acções dos agentes atmosféricos a que este é sujeito.

As pás são normalmente fabricadas a partir de compostos sintéticos, tal como plásticos reforçados com fibra de vidro. São materiais facilmente moldáveis, robustos, resistentes à fadiga e com boa relação qualidade/preço. As fibras de carbono, mais dispendiosas, têm melhores qualidades mecânicas.

2.2.3.1.2. O gerador

O gerador converte a energia mecânica presente no rotor em energia eléctrica.

Estas máquinas estarão sujeitas a constante variação da velocidade de rotação, factor este de extrema importância no dimensionamento. Existem fundamentalmente três tipos de aerogeradores com aplicação industrial: as máquinas assíncronas, com e sem controlo do ângulo de *pitch* (foram muitas utilizadas mas no mercado actual têm uma expressão reduzida), as máquinas assíncronas duplamente alimentadas e as máquinas síncronas de velocidade variável. As duas últimas funcionam com conversores electrónicos o que permite a variação de velocidade do rotor assim como a regulação do factor de potência. A flexibilidade do sistema obtida por meio destes conversores, para além de tornarem o sistema mais robusto, possibilitam a absorção de variações bruscas de potência, isto é evitam que essas variações sejam directamente transmitidas à rede.

Na figura II-8 são enumeradas as configurações possíveis das máquinas usadas na construção de um aerogerador.

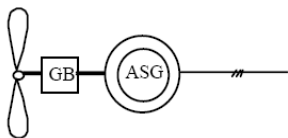
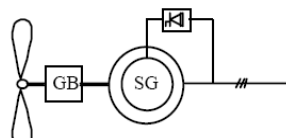
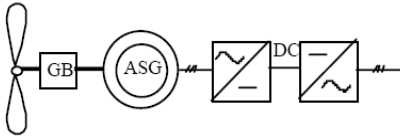
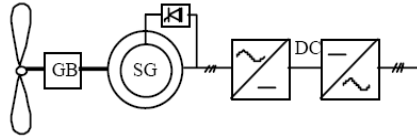
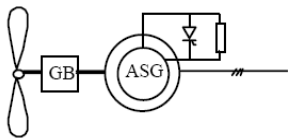
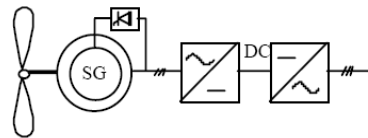
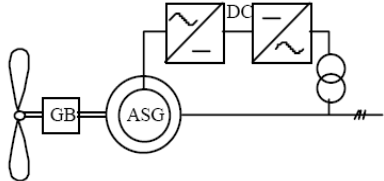
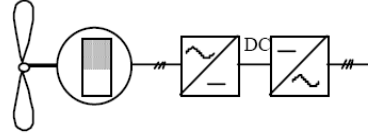
ASYNCHRONOUS GENERATORS	SYNCHRONOUS GENERATORS
<ul style="list-style-type: none"> direct grid connection  <p>$n = (1-s) f/p$ $s = 0 \dots 0.08$ inductive reactive power consumer</p>	<ul style="list-style-type: none"> direct grid connection  <p>$n = f/p$ controllable reactive power output</p>
<ul style="list-style-type: none"> grid connection via DC link  <p>$n = 0.8 \dots 1.2 f/p$ controllable reactive power output with suitable converter</p>	<ul style="list-style-type: none"> grid connection via DC link  <p>$n = 0.5 \dots 1.2 f/p$ controllable reactive power output with suitable converter</p>
<ul style="list-style-type: none"> dynamic slip control  <p>$n = (1-s) f/p$ $s = 0 \dots 0.1 \dots 0.3$ inductive reactive power consumer</p>	<ul style="list-style-type: none"> grid connection via DC link, gear-less  <p>$n = 0.5 \dots 1.2 f/p$ controllable reactive power output with suitable converter</p>
<ul style="list-style-type: none"> doubly-fed asynchronous generator 	<ul style="list-style-type: none"> PMSG connected via DC link  <p>$n = 0.6 \dots 1.2 f/p$ controllable reactive power output with suitable converter</p>

Figura II-8: Máquinas síncronas e assíncronas usadas em aerogeradores [19].

2.2.3.1.3. A cabina

A cabina é o local onde se encontram alojados os constituintes do aerogerador, o veio principal, o travão de disco, a caixa de velocidades caso exista, o gerador e o mecanismo de orientação direcciona.

No veio principal, que transfere o binário primário do rotor à caixa de velocidades, estão montadas as tubagens de controlo hidráulico dos travões aerodinâmicos,

O gerador converte a energia mecânica presente no veio em energia eléctrica.

O mecanismo de orientação direcciona tem como função alinhar o rotor com a direcção do vento dominante de modo a ser extraída a máxima energia possível.

Há ainda um anemómetro e um sensor de direcção os quais executam as medidas necessárias ao correcto funcionamento do sistema de controlo.

2.2.3.1.4. A torre

A torre suporta a cabina uma altura tal que o rotor fica posicionado a uma cota em que a velocidade de vento é maior e menos perturbado do que no solo.

As torres tubulares são construídas em diversos troços de aço ou betão que são montados no local com a ajuda de equipamento e máquinas adequadas, nomeadamente guas.

2.3. A energia eólica no Mundo

A nível mundial, no final do ano de 2005 a potência instalada era superior a 59 GW apesar de o seu potencial continuar sub-explorado. Durante o ano de 2006 foram instalados 15.197 MW, o que totaliza 74.223 MW no final de 2006, [10].

O mercado da potência eólica instalada é liderado basicamente por 5 países, a Alemanha (20.622 MW), a Espanha (11.615 MW), os Estados Unidos (11.603 MW), a Índia (6.270 MW) e a Dinamarca(3.136 MW) [10].

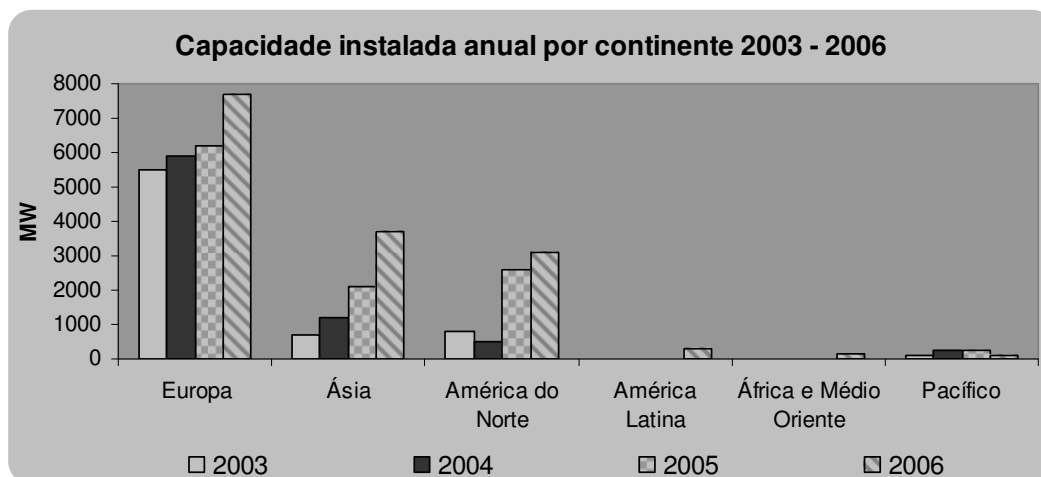


Figura II-9: Capacidade instalada anualmente por continente [10].

A Europa, segundo o relatório anual de 2006 apresentado pelo Global Wind Energy Council – GWEC [10], tem 48,545 MW de potência instalada o que representa 65% da potência total instalada mundialmente. Portanto a Europa que atingiu a meta para o ano 2010 cinco anos antes, apresenta-se actualmente como líder do mercado mundial de energia eólica.

Na Europa no ano de 2006 a exploração do recurso eólico cresceu 19%. Durante o ano de 2005 houve um acréscimo de 6.000 MW de potência instalada correspondentes a um aumento de 18%. Passou de 34.372 MW existentes no final de 2004 para 40.504 MW no final de 2005. Em média, a potência instalada na Europa no fim do ano de 2006 produz cerca de 100 TWh, isto é, 3,3% do consumo de energia registado na Europa.

Na última década a energia eólica teve um crescimento médio de 32% por ano na União Europeia o que corresponde a um crescimento de 22% no mercado durante o mesmo período.

Em 2006, o mercado europeu era liderado basicamente por 5 países, são eles: a Alemanha, a Espanha, Portugal, a Itália, e o Reino Unido. Sendo os países com maior potência instalada a Alemanha, com 20.622 MW, a Espanha, com 11.615 MW, a Dinamarca, com 3.136 MW, a Itália, com 2.123 MW, o Reino Unido, com 1.963 MW, Portugal, com 1.716 MW, a França, com 1.567 MW e os Países Baixos, com 1.560 MW.

No continente asiático, durante o ano de 2006, foram instalados 3.679 MW. No final do ano havia instalados 10.667 MW. O mercado Asiático é liderado pela Índia (6.320 MW), seguida pela China (2.604 MW) e pelo Japão (1.394 MW).

Os Estados Unidos instalaram a maior quantidade de capacidade de produção de energia eólica, 2.454 MW, durante o ano de 2006. Lideraram o mercado Norte Americano, com 11.603 MW instalados no final do ano de 2006, tendo o Canadá somente 1.449 MW.

Na América Latina foram instalados em 2006, 296 MW, 208 MW dos quais no Brasil, e no final do ano totalizavam 508 MW.

Em África e no Médio Oriente estão instalados 441 MW. O mercado cresceu cerca de 63% em 2006, que corresponde à potência instalada no Egito, em Marrocos e no Irão.

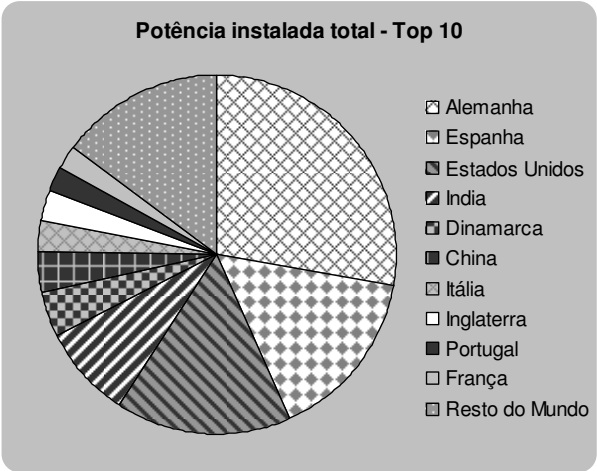


Figura II-10: Potência eólica instalada total – Top 10 [10].

	MW	%
Alemanha	20.622	27,80%
Espanha	11.615	15,60%
Estados Unidos	11.603	15,60%
Índia	6.270	8,40%
Dinamarca	3.136	4,20%
China	2.604	3,50%
Itália	2.123	2,90%
Inglaterra	1.963	2,60%
Portugal	1.716	2,30%
França	1.567	2,10%
Resto do Mundo	11.005	14,80%
Total Top 10	63.219	85,20%
Total	74.224	

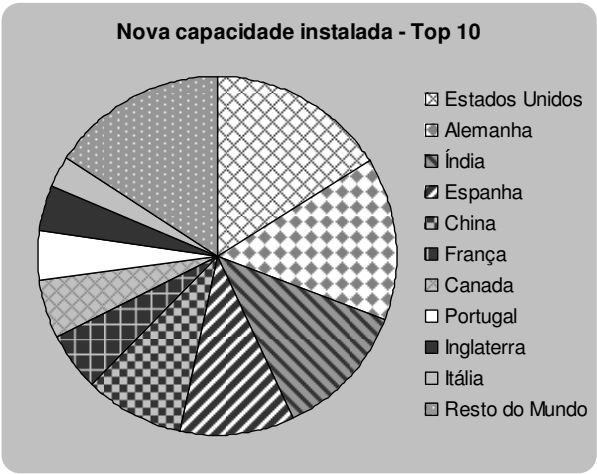


Figura II-11: Nova potência eólica instalada – Top 10 [10].

	MW	%
Estados Unidos	2.454	16,1%
Alemanha	2.233	14,7%
Índia	1.840	12,1%
Espanha	1.587	10,4%
China	1.347	8,9%
França	810	5,3%
Canadá	776	5,1%
Portugal	694	4,6%
Inglaterra	634	4,2%
Itália	417	2,7%
Resto do Mundo	2.405	15,8%
Total Top 10	12.792	84,2%
Total	15.197	

		Total final 2005	Começo 2006	Total Final 2006
África e Médio Oriente	Egipto	145	85	230
	Marrocos	64	60	124
	Irão	23	27	48
	Tunísia	20	0	20
	Outros	11	0	11
	Total	271	172	441
Asia	Índia	4.430	1840	6270
	China	1.260	1347	2604
	Japão	1.061	333	1394
	Taiwan	104	84	188
	Coreia do Sul	98	75	173
	Filipinas	25	0	25
	Outros	13	0	13
	Total	6.990	3679	10667
Europa	Alemanha	18.415	2233	20622
	Espanha	10.028	1587	11615
	Dinamarca	3.128	12	3136
	Itália	1.718	417	2123
	Inglaterra	1.332	634	1963
	Portugal	1.022	694	1716
	França	757	810	1567
	Holanda	1.219	356	1560
	Austria	819	146	965
	Grécia	573	173	746
	Irlanda	496	250	745
	Suécia	510	62	572
	Noruega	267	47	314
	Bélgica	167	26	193
	Polónia	83	69	153
	Resto da Europa	364	192	556
	Total Europa	40.898	7708	48545
	Fora EU - 27	40.512	7611	48062
América Latina e Caraíbas	Brasil	29	208	237
	México	3	85	88
	Costa Rica	71	3	74
	Caraíbas	35		35
	Argentina	27		27
	Colombia	20		20
	Jamaica	20		20
	Outros	7		7
	Total	212	296	508
América do Norte	Estados Unidos	9.149	2454	11603
	Canadá	683	776	1459
	Total	9.832	3230	13062
Região do Pacífico	Austrália	708	109	817
	Nova Zelândia	169	3	171
	Ilhas do Pacífico	12		12
	Total	889	112	1000
Total do Mundo		59.091	15197	74223

Tabela II-1: Potência eólica instalada no Mundo [10].

A taxa média de crescimento anual do mercado mundial prevista para o período de 2005 a 2010 situa-se nos 18%, contra os 2% verificados entre o ano 2000 e 2005 [10]. Em 2010 serão instalados 17,8 GW o que representa um crescimento de 55% comparativamente à potência instalada em 2005, que era de 11,5 GW [10].

O crescimento da produção de energia eléctrica a partir do vento encontra-se limitado às capacidades de produção e ao desenvolvimento tecnológico das máquinas e dos diversos sistemas necessários à implementação deste tipo de parques para produção de energia.

Na ultima década foram desenvolvidos os mercados *offshore* que apresentam, actualmente, um forte potencial para exploração. O grande obstáculo prende-se com a necessidade, principalmente por razões ambientais, de implementar este tipo de parques longe da costa. Na Alemanha esta questão obriga a que alguns parques cheguem a estar situados a cerca de 40 a 60 km.

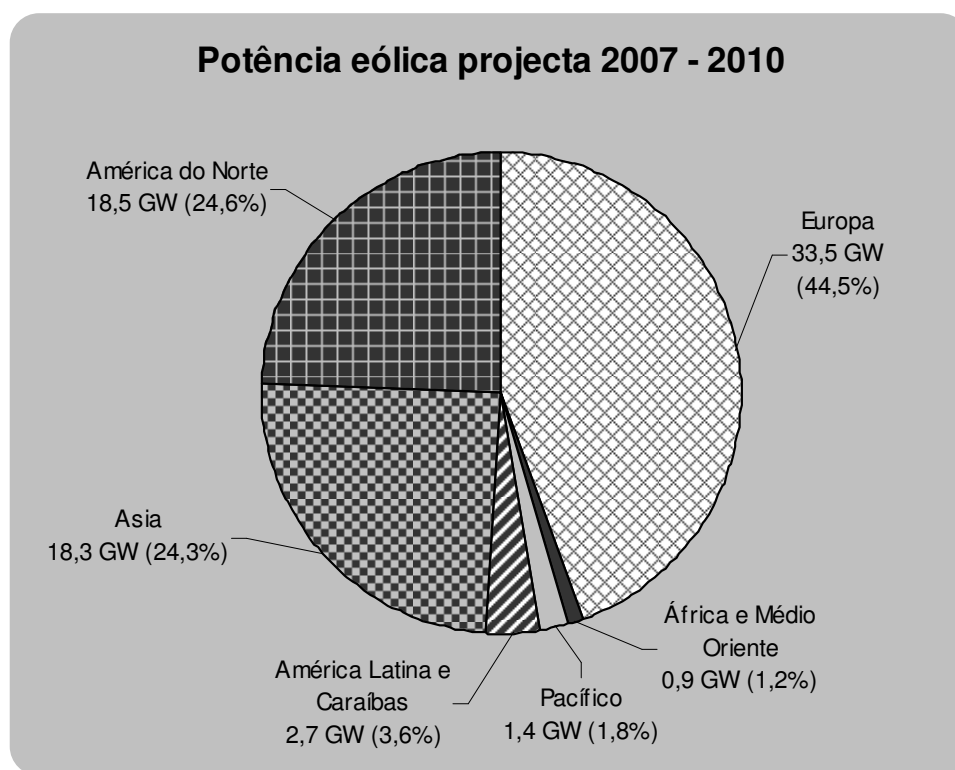


Figura II-12: Potência eólica projectada para instalar no Mundo entre 2007 e 2010 [10].

2.3.1. Incentivos à utilização de energia eólica

A evolução da energia eólica na última década vai ao encontro dos objectivos delineados pela União Europeia para a promoção da produção de energia eléctrica a

partir de fontes de energia renovável, Directiva 2001/ 77/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de Setembro de 2001. Segundo esta Directiva a criação de quadro que facilite o aumento de produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis “*constitui uma parte substancial do pacote de medidas necessárias ao cumprimento do protocolo de Quioto e à Convenção Quadro das Nações Unidas relativa às alterações climáticas*”.

As alterações dos mecanismos de gestão e regulamentação dos mercado e do sector eléctrico levaram ao surgimento de novas regras e políticas que, para além de considerarem e regulamentarem a actividade das energias renováveis, motivaram e agilizaram o seu desenvolvimento.

A maioria dos países criou políticas compensatórias que remuneram a energia entregue à rede proveniente de fontes renováveis. A rede por sua vez está obrigada a receber toda a potência injectada.

De seguida, será apresentado “o estado da arte” de diversos países do Mundo em que a energia eólica se encontra em desenvolvimento, com base no relatório *Global Wind 2006 Report* elaborado pelo *Global Wind Energy Council* [10].

2.3.1.1. Alemanha

No final do ano de 2006, existiam na Alemanha 18.685 aerogeradores que correspondem a 20.622 MW de potência instalada, sendo o líder mundial no que respeita à produção eólica.

Recentemente, a Alemanha tem vindo a apostar em planos futuros para aproveitamento do seu potencial *offshore*.

A produção *offshore* é superior a existente *onshore* e por isso há possibilidade de a aumentar substancialmente. Há possibilidade de aumentar o tamanho dos aerogeradores e de aproveitar velocidades de vento superiores às suportadas pelas turbinas que actualmente existem no mercado *onshore*. Um incremento de 10% na velocidade do vento implica, em teoria, um aumento de 30% na energia produzida. No entanto, o preço da energia produzida *offshore* é ainda superior ao da energia produzida *onshore*.

Uma forma de incentivar o investimento e desenvolvimento tecnológico das energias renováveis passa pela imposição de medidas regulamentares que agilizem e alterem o sistema para que este se ajuste e modele ao enquadramento da energia produzida a partir das diversas fontes de energia renovável.

Os operadores do sistema são obrigados a aceitar toda a energia injectada proveniente de fontes renováveis e a pagar uma tarifa mínima remuneratória.

A grande penetração de produção eólica na Alemanha levou ao surgimento de novas questões e desafios que, para serem ultrapassados, implicam a correcta regulamentação da interligação deste tipo de produção no sistema eléctrico. O primeiro regulamento alemão criado para gerir a interligação de parques eólicos foi realizado pela E. On Netz, O Operador do Sistema (TSO), em Agosto de 2003.

2.3.1.2. Espanha

Em Janeiro de 2007, em Espanha existiam 11.615 MW de potência eólica instalada. A capacidade de produção de energia eólica cresceu 15,8% no ano de 2006, tendo sido instalados 1.587 MW, o que ficou aquém das expectativas comprometendo os objectivos propostos pelo governo no Plano das Energias Renováveis (PER) que é de 20.155 MW de potência instalada em 2010.

A região da Galiza é aquela com maior predominância da energia eólica seguida da região de Castela, mas é em Valência, na Catalunha e na Andaluzia que se em

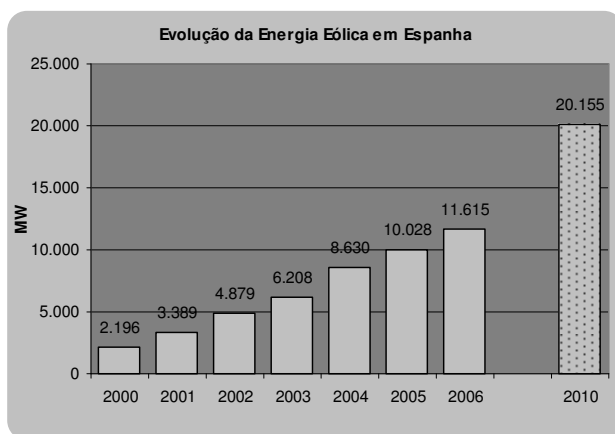


Figura II-13: Evolução da potência eólica instalada em Espanha [10].

verificado uma maior aumento da potência instalada, 136,1%, 57% e 36% no ano de 2006 relativamente ao ano anterior, respectivamente.

No ano de 2006 foram gerados 22.199 GWh de energia a partir do vento, um incremento de apenas 6,48% em relação a 2005 visto ter sido um ano com menor quantidade de recurso eólico disponível, que representam cerca de 9% da carga existente.

O Governo Espanhol, como medida de incentivo à expansão da produção eólica, regulamentou novas tarifas para todos os parques interligados a Centros de Controlo, que, por sua vez, se encontram ligados ao Centro de Despacho de Energias Renováveis CECRE a partir do qual são dadas as ordens de exploração que os parques eólicos terão de seguir.

A estratégia de promoção das energias renováveis em Espanha está definida nos documentos “Estratégia para as Alterações Climáticas e Energias Limpas” e “Plano de

Iniciativas Ambientais para 2007-2008”. Pretendem ser atingidas as metas de 20% de energia renovável em 2020 e 32 e 37% de energia eléctrica produzida a partir de fontes renováveis em 2012 e 2020, respectivamente.

2.3.1.3. Itália

A Itália assumiu com a Comissão Europeia a produção de pelo menos 25% da energia eléctrica a partir de fontes de energia renovável no ano de 2010 e a potência eólica instalada de 2.500MW, tal como consta no Livro Branco Italiano, de 1999.

O Governo Italiano criou regulamentação de incentivo à produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis, nomeadamente tarifas remuneratórias fixas nos primeiros oito anos de produção do sistema.

O grande obstáculo ao desenvolvimento da energia eólica em Itália, neste momento, é ao nível das autorizações e regulamentos regionais, como é o caso das autoridades regionais da Sardenha que dificultam e impedem a criação de instalações deste tipo. A falta de clareza da legislação que regulamenta o sistema e as dificuldades de criação de interligações na rede agravam este cenário.

A maioria dos parques eólicos encontram-se no Sul do país, mas a tendência é de expansão e desenvolvimento, passando pela instalação de aerogeradores de maior potência.

O crescimento da produção eólica no ano de 2006 foi de 30%, permitindo prever que o objectivo de 2.500 MW instalados será atingido no final do ano de 2007. A Associação Nacional da Energia do Vento (ANEV), estimou que será necessário atingir os 8.000 MW de potência instalada para ser possível produzir 25% da energia eléctrica a partir de fontes renováveis.

O Governo Italiano deverá rever e reforçar os decretos-lei criados com a finalidade de incentivar o desenvolvimento das energias renováveis.

2.3.1.4. Reino Unido

A produção eólica deverá ser a principal fonte de produção a partir de energias renováveis que permitirá ao Reino Unido atingir a meta definida de 10% da energia eléctrica produzida a partir de fontes renováveis.

A *British Wind Energy Association* (BWEA) [1.6] prevê a instalação de 8.000 MW até 2010 o que representa mais de três quartos do objectivo nacional.

O Reino Unido é o país europeu com maior recurso de vento disponível, como pode ser comprovado pela apreciação do atlas europeu de vento, figura número II-2.

Nos últimos anos foram criados incentivos e atractivos, certificados verdes, baseados na lógica de mercado, que aliciam os investidores.

No final do ano de 2006 encontravam-se instalados 1.963 MW, 630,8 MW dos quais forma instalados durante o ano de 2006, e estima-se que em 2007 serão instalados mais 985 MW. Só em Glasgow, durante este ano, foi implementado um projecto de 322 MW para além de outros a serem desenvolvidos em *off-shore*.

Um obstáculo a ser superado pelo Reino Unido prende-se com a rapidez da decisão e aprovação dos projectos, isto é, a redução do tempo de licenciamento. No final do ano de 2006, cerca de 5.492 MW a instalar na Escócia aguardavam uma decisão e muitos outros projectos têm surgido, comprovando o clima de confiança vivido.

A exploração do potencial *off-shore* está em fase de expansão com a instalação de aerogeradores de 1.200 MW prevendo-se que sejam atingidos 7% da produção electricidade.

2.3.1.5. Estados Unidos da América – EUA

Segundo a *American Wind Energy Association* (AWEA) [I.7] o crescimento do sector eólico atingiu o valor máximo no ano de 2006, com 11.603 MW instalados no final do ano, consequência dos incentivos e benefícios fiscais concedidos até ao fim do ano de 2008. O *production tax credit PTC* oferece 1,9 cêntimos por kWh gerado a partir de aerogeradores durante os primeiros 10 anos.

Nos EUA, actualmente, a energia eólica é a segunda maior fonte de energia eléctrica a partir de novas tecnologias de produção, a seguir ao gás natural. Durante o ano de 2007 a energia eléctrica produzida nos parques eólicos americanos, estimada em 31 GWh, representou cerca de 0,7% da produção de energia eléctrica do país e alimentou 2,9 milhões de famílias.

Para além dos benefícios fiscais, que atraem diversos investidores, a energia eólica é uma mais valia no que respeita à diminuição dos índices de poluição existentes e de segurança energética, visto que este recurso não é vulnerável aos conflitos socio-económicos, ao contrário do gás natural e do petróleo.

O estado do Texas é aquele que apresenta maior potência instalada logo seguido da Califórnia. Nos últimos anos têm sido criadas oportunidades de negócio e postos de trabalho no desenvolvimento da energia eólica. A *Gamesa* [I.8] investiu na criação de

novos parques eólicos na Pensilvânia, a *Clipper Windpower* [I.9] e a *Siemens*, por sua vez, nos estados de Iowa, e a *Suzlon Wind Energy Corporatio* [I.10] abriu uma fábrica no Minnesota. Em Março de 2007, a EDP – Energias de Portugal comprou a *Horizon Wind Energy LLC* [I.11], uma empresa americana de gestão e operação de parques eólicos, e recentemente assinou contrato com a *Suzlon Energy* para o fornecimento de aerogeradores até 2009.

A AWEA, juntamente com outras organizações, estimam que o desenvolvimento da energia eólica será benéfico não só do ponto de vista ambiental, como também a nível do desenvolvimento económico rural, da criação de emprego,... indicando como meta exequível e acessível a produção de 20% da energia eléctrica consumida no país a partir do recurso eólico existente. Para tal é necessário criar condições políticas, ambientais, energéticas e regulamentares.

2.3.1.6. Canadá

O recorde mundial de potência instalada num ano pertence ao Canadá que no ano de 2006 registou um aumento de 113% relativamente a 2005 instalando 776MW. Os projectos desenvolveram-se nas províncias de Ontario, Québec, Manitoba, Nova Scotia, British Columbia e Terra Nova e novos projectos surgiram durante o ano de 2007 em New Brunswick, para além de outros nas províncias já enumeradas. As previsões apontam para que em 2010 estejam instalados mais de 5.000 MW, tendo o governo colocado a meta de 10.000 MW instalados no final do ano de 2015.

Canadá: Potência Instalada Total							
Ano	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
MW	137	198	236	322	444	684	1,46

Tabela II-2: Evolução da energia eólica no Canadá [10].

A enorme expansão da produção eólica deve-se a factores relacionados com a defesa do ambiente, o desenvolvimento económico a nível regional e a segurança no abastecimento. Várias medidas de incentivo têm sido criadas, quer a nível regional quer nacional, pelo governo, nomeadamente o programa *ecoEnergy Renewable Power* que financia 1 cêntimo por kWh durante os primeiros 10 anos de produção de cada parque eólico.

Há alguns obstáculos a ultrapassar relacionados com a capacidade de interligação dos parques eólicos com a rede de transmissão.

O mercado canadiano encontra-se em franco crescimento pelo que as dificuldades enunciadas anteriormente serão certamente ultrapassadas e obtidos os resultados expectáveis.



Figura II-14: Parque eólico no Canadá.

2.3.1.7. Brasil

No Brasil, a produção de energia eléctrica a partir de fontes de energia renováveis, sobretudo hídrica, representa cerca de 44% de toda a electricidade produzida.

Nos projectos de electrificação rural as fontes de energia alternativas têm uma forte expressão devido, muitas vezes, à escassez de combustível, ao custo do seu transporte e aos conhecidos benefícios ambientais.

Segundo o atlas de vento elaborado pela Centro de Energia Eólica Brasileiro, o recurso eólico disponível no Brasil viabiliza a instalação de cerca de 143.000 MW, sobretudo nos estados do Nordeste, do Sul e Sudeste do país.

Durante o ano de 2006 foram instalados 208 MW o que representa um crescimento de 717%, comparativamente com o ano anterior.

A valorização do aproveitamento do potencial de biomassa e o peso da importação não deixou espaço para o crescimento da energia eólica, mas espera-se que esta conjuntura seja invertida. Com vista a melhorar a segurança de abastecimento, o governo brasileiro criou programas de incentivo à instalação de centrais térmicas e de produção renovável.

O programa PROINFA promove o desenvolvimento da produção a partir da biomassa, da energia eólica e das pequenas hídricas. Este programa garante contratos de compra de energia para 3.300 MW de potência instalada até 2007. Para além do PROINFA, o Banco Nacional de Desenvolvimento Brasileiro oferece condições especiais de financiamento a projectos elegíveis pelo PROINFA.

Na primeira fase estima-se que sejam investidos 2,6 mil milhões de dólares americanos e criados 150.000 novos postos de trabalho. Na segunda fase espera-se que seja atingida a meta de 10% do consumo de energia eléctrica coberto pela produção a partir de fontes renováveis.

2.3.1.8. Índia

A Índia é, actualmente, o quarto maior produtor do Mundo de energia eólica com 6.320 MW instalados no final do ano de 2006 tendo sofrido um crescimento de cerca de 43%.

Índia: Potência Instalada Total							
Ano	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
MW	1,22	1,456	1,702	2,125	3	4,43	6,32

Tabela II-3: Evolução da energia eólica na Índia [10].

O potencial eólico indiano foi estimado, pelo *Centre for Wind Energy Technology*, em cerca de 45.000 MW valor este assumido pelo *Ministry of New and Renewable Energy MNRE*. Nos anos 90, a *Indian Wind Turbine Manufacturers Association IWTMA* aumentou este valor para 65.000 MW.



Figura II-15: Parque eólico na Índia.

O governo indiano criou incentivos fiscais para o sector da energia eólica que, a par com as políticas regionais, tornaram aliciente o investimento e a exploração deste tipo de sistemas.

Outras medidas de incentivo criadas passaram pelo valor das tarifas de remuneração e pela imposição de taxas mínimas de vinculação de energia renovável pelas empresas de distribuição de energia eléctrica.

Actualmente, cerca de 97% dos parques eólicos indianos provém de capitais privados. Para atrair o desenvolvimento e investimento das indústrias na energia eólica, assim como de capital estrangeiro, está a ser

considerada a criação de uma *Production Tax Credit*.

Um pouco por todo país novos projectos têm surgido esperando o governo indiano ultrapassar a meta dos 10.000 MW instalados em 2010.

2.3.1.9. Japão

Nos últimos anos o governo japonês impôs às companhias do sector eléctrico o aumento da percentagem de energia eléctrica produzida a partir de fontes de energia renovável. Este facto associado a incentivos ao nível do mercado, promoveu as novas fontes de energia, nomeadamente a energia eólica que passou de 461 MW instalados em 2002 para cerca de 1400 MW em Dezembro de 2006. A meta a atingir até 2010 situa-se nos 3.000 MW.

Aquando do Protocolo de Quioto, o Japão comprometeu-se a diminuir as suas emissões de gases com efeito de estufa em 6%, relativamente ao ano de 1990. Para garantir que tal objectivo venha a ser alcançado, em 2003, foi elaborado o *Renewable Portfolio Standard RPS*, regulamentação de promoção das energia renováveis para que estas representem, em 2010, 1,35% da energia consumida, e criados programas de subsídios, *Field Test and new Energy Business Support Programmes*.

A *Japanese Wind Energy Association* e a *Japanese Wind Power Association* [I.12] têm sido responsáveis pela I&D na área da estabilidade da rede, da segurança e da previsão de geração.

O recurso eólico disponível nas regiões montanhosas do Japão não tem muita qualidade pois, com alguma frequência, ocorrem períodos de grandes rajadas de vento e de alta turbulência para além das questões relacionadas com a segurança



devido ao país se encontrar em zona de grande intensidade sísmica. O forte potencial do Japão é em sistemas *off-shore* que se encontra praticamente inexplorado devido a questões de ordem social e de confronto com a indústria pesqueira.

Figura II-16: Parque eólico no Japão.

2.3.1.10. Austrália

É na Austrália que se pode encontrar um dos melhores recurso de vento disponível do Mundo que, aliado à boa conjuntura económica do país, cria um cenário propício ao desenvolvimento de um bom mercado de energia eólica.

A política ambiental adoptada no estado de Victoria, tem como objectivo a produção de 10% da energia eléctrica produzida a partir de fontes de energia renovável até ao fim do ano de 2016, o que representa cerca de 3.217 GWh. Na Austrália do Sul, onde se encontra cerca de metade da potência instalada no país, a meta sobe para 20% de energia eléctrica produzida a partir de fontes renováveis até ao ano de 2014. No estado de nova Gales do Sul, estima-se que seja atingida a percentagem de 10% até 2010 e de 15% até 2020.

Austrália: Potência Instalada Total							
Ano	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
MW	32	73	105	198	380	708	817

Tabela II-4: Evolução da energia eólica na Austrália [10].

Após a grande expansão verificada entre os anos 2003 e 2005 houve um abrandamento em 2006. Tal deve-se à falta de medidas estaduais concretas de incentivo à produção renovável.

Durante o ano de 2006 foram concluídos dois novos parques em Vitoria e na Austrália Ocidental, com capacidade de 30 MW e 19,2 MW, respectivamente.

Existem vários projectos em fase de construção, cerca de 494 MW, que serão impulsionados e apoiados pelos novos incentivos anunciados pelo estado.

O trabalho desenvolvido em parceria pela *Auswind* e pelo *Australian Council of National Trust*, nomeadamente a revisão das linhas directrizes o *Auswind's Best Practice Guidelines*, tem como objectivo promover a industria eólica e a criação de projectos que vão ao encontro das necessidades e expectativas da comunidade.

2.4. A energia eólica em Portugal

Em Janeiro de 2007, existiam em Portugal 1716 MW [5] de potência instalada o que corresponde a um terço da meta assumida para o cumprimento do protocolo de Quioto, que são 5100 MW em 2012. No final de 2007, o valor de potência eólica instalada, de ligação à rede pública, já ultrapassou os 2000 MW [34], correspondentes a um crescimento na ordem dos 10%, em relação ao ano anterior.

Em Dezembro de 2006 iniciou-se a construção de parques com mais 536 aerogeradores com os quais se atingirá 2779 MW de energia eólica. Isto é, estão já garantidos 54% da meta traçada e prevê-se que em 2010 a potência eléctrica instalada em aerogeradores atinja os 4700 MW.

Portugal apresenta um potencial eólico que sendo aproveitado ao seu máximo contribuirá para a criação de valor quer para o País quer para o próprio sistema eléctrico.

O aumento da produção de energia a partir de fontes renováveis é o ponto de partida para o cumprimento das metas impostas pela União Europeia e pelo protocolo de Quioto. O aproveitamento máximo do potencial eólico nacional passa por definir a estratégia de gestão do sistema electroprodutor e efectuar uma distribuição regional do potencial de desenvolvimento eólico.

Do ponto de vista da gestão do sistema é essencial alcançar a optimização do despacho da produção renovável, aumentando a quantidade de energia entregue à rede. Novos conceitos e metodologias têm vindo a surgir através dos quais será possível ultrapassar as barreiras existentes, nomeadamente:

1. Previsão da produção eólica em Portugal continental;
2. Monitorização e despacho económico, da produção por “clusters eólicos”;
3. Planeamento da integração de parques eólicos na rede;
4. Estudos da compatibilidade de produção hídrica e eólica, armazenamento de energia renovável e a gestão de consumos.

Os dados de modelos globais de previsão de tempo e os modelos numéricos existentes são já adequados, tornando exequível a previsão de produção eólica. É sempre de ter em conta os factores locais que influenciam cada parque eólico para que a sua modelização se aproxime o mais possível da situação real. O aproveitamento dos recursos passa por decisões político - estratégicas e económicas.

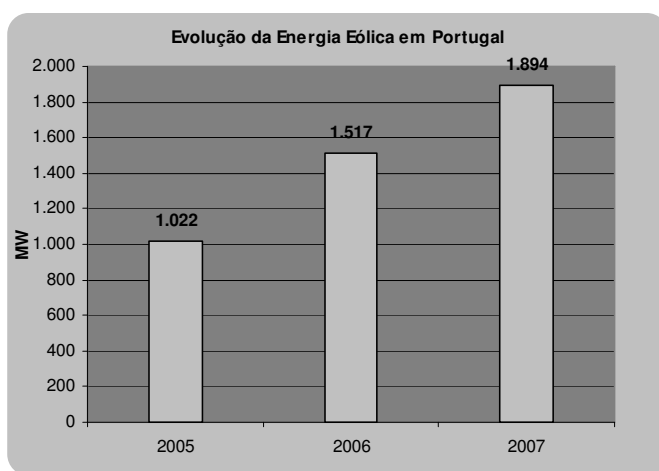
Quanto ao estudo da complementaridade entre a produção eólica e a hídrica é necessário correlacionar os recursos energéticos por região ao longo do ano. Com estes estudos é possível planear acções de bombagem em centrais hídricas e assim armazenar energia eólica, quando esta é produzida em períodos de vazio.

Este tipo de acções deve ser avaliado também ao nível dos custos, retribuições esperadas e das mais valias criadas.

2.4.1. Produção em Portugal

Segundo o relatório publicado pela REN [8] em Julho de 2007, em Portugal existiam 148 parques eólicos correspondendo a uma potência total instalada de 1731MW e a 17% da potência total do Sistema Eléctrico Nacional SEN. À data do relatório publicado [8], o maior parque tinha 121 MW e o menor 0,5 MW de potência instalada.

Em 2007, a produção eólica representou cerca de 8% do consumo total de energia eléctrica no ano, correspondendo a um crescimento de 65% em relação ao ano de 2006 [8]. A produção eólica em Portugal apresenta, tipicamente, um mínimo em Setembro e um máximo em Dezembro. Nos dias 19 e 20 de Dezembro foram atingidos valores de consumo na ordem dos 180 e 175 GWh, respectivamente, para os quais a



produção de energia eólica contribuiu com cerca de 21% [1.18]. A utilização média da potência eólica ligada à rede, no ano de 2007, atingiu os 27%.

Em 2007, a produção eólica nacional revelou-se útil tendo contribuído para suprir 21 % das necessidades dos dias de maior consumo no ano.

Figura II-17: Evolução da Energia Eólica em Portugal [34].

2.5. A integração da produção eólica nos sistemas eléctricos

Aquando da criação dos sistemas eléctricos a produção de energia concentrava-se em grandes centrais produtoras e por isso estes não foram previstos para absorverem produção distribuída. Assim, a integração da produção distribuída, tal como a eólica, nos sistemas eléctricos existentes cria novos desafios e oportunidades e impõe um cenário de mudança.

A integração dos parques eólicos quer na rede quer nos mercados de energia lança novas questões e obriga ao estudo e desenvolvimento de novas regras e requisitos de interligação bem como de exploração da rede eléctrica.

Recentemente, devido ao incremento de injeção de energia proveniente da produção eólica na rede, vários países tiveram necessidade de alterar os seus regulamentos

que regem o sector eléctrico para que estes passassem a incluir requisitos e regras a impor aos parques eólicos.

A produção eólica nos últimos anos atingiu valores percentuais de potência instalada bastante significativos podendo causar graves problemas no caso de falha da tecnologia. As principais questões relacionadas com a interligação dos parques eólicos à rede dizem respeito ao comportamento e desempenho das máquinas, visto que uma falha da tecnologia pode causar graves problemas na rede. Estas devem ser robustas e seguras devendo garantir:

- a capacidade dos aerogeradores para resistirem a cavas de tensão (“ride through defaults”) na rede;
- a resposta ao incremento e decréscimo de produção;
- a capacidade de funcionar como compensadores do factor de potência (produção de energia reactiva);
- boa resposta à variação frequência;
- a capacidade de realizar o chamado “black start”.

Todas as normas e requisitos elaborados têm como finalidade garantir que a produção eólica contribui para a estabilidade da rede e para o seu correcto funcionamento. De país para país, a grande diferença encontra-se nos valores limite e de referência.

A Dinamarca e a Alemanha têm uma grande concentração de parques eólicos pelo que um distúrbio na rede do qual resulte uma queda de tensão ou frequência pode causar a saída em cascata dos parques eólicos, situação de grave efeito na rede. Para evitar este cenário, os Operadores do Sistema – *Transmission System Operators TSO's* – dinamarquês e alemão impuseram o requisito de os parques permanecerem conectados durante um período de 100 e 150 milissegundos, respectivamente.

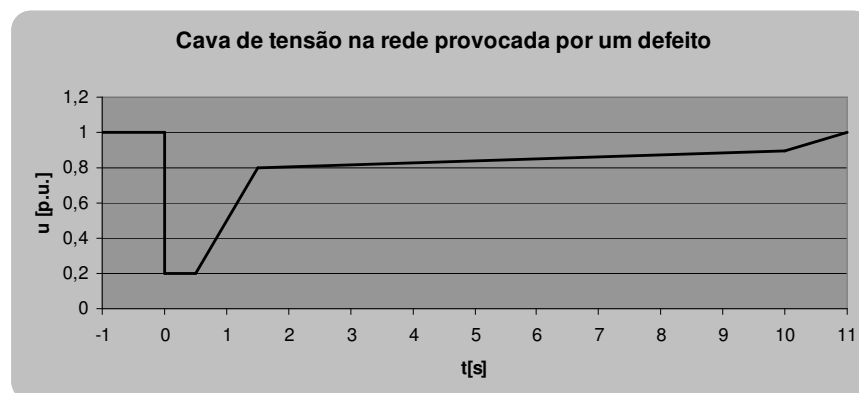


Figura II-18: Defeito na rede - “defaults”- [2].

A Espanha, a Irlanda e os Estados Unidos são mais exigentes, estando os parques eólicos obrigados a sobreviver às cavas de tensão por períodos de 500 e 650 milissegundos, respectivamente.

Um outro requisito exigido é a continuidade de operação dos parques eólicos quando a frequência atinge valores fora dos limites mínimo e máximo. Esta situação corresponde ao momento em que há um défice ou um excesso de injeção de energia produzida na rede. Os TSO's pretendem que a produção eólica seja capaz de responder à variação de frequência aumentando ou diminuindo a produção nesses instantes. No que respeita à diminuição de produção não surgem grandes dificuldades em obter uma resposta em frequência. No entanto, quando é impreterível aumentar a produção, se não existir recurso eólico disponível torna-se impraticável respeitar esse requerimento. Tal só será possível caso o parque eólico se encontre a funcionar aquém das suas capacidades.

Do ponto de vista económico, não é interessante ter um parque eólico que não aproveita por completo o recurso eólico existente e o desempenho das suas máquinas e, por essa razão, esta condição não é bem acolhida entre os promotores. Esta situação levanta a questão do sobre-dimensionamento dos parques eólicos e da remuneração a nível do mercado dos aproveitamentos requisitados para fazer face à variação de frequência.

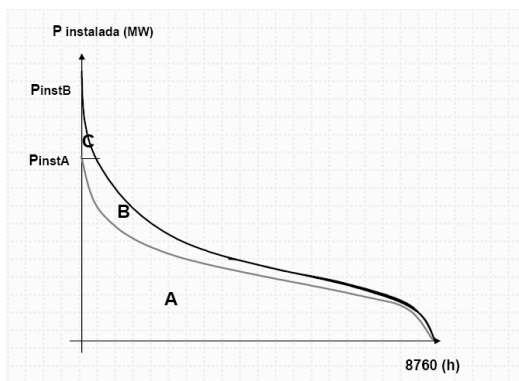


Figura II-19: Curvas de probabilidade acumulada de um parque eólico sobre-dimensionado e não sobre-dimensionado [32].

A probabilidade do parque se encontrar em produção com o total da potência instalada é baixa. Assim, sobre-dimensionando os parques a probabilidade de este estar a injectar o máximo de energia eléctrica que lhe é permitida aumenta, assim como aumenta a sua capacidade de responder a variações de frequência.

As máquinas assíncronas apresentam um comportamento semelhante ao do motor de indução em regime de funcionamento hiper-síncrono e assim necessitam de absorver energia reactiva para o seu correcto funcionamento. Para evitar problemas na rede, a produção eólica é obrigada a encontrar-se habilitada a injectar e a absorver energia reactiva da rede de forma a manter o sistema sem distúrbios. Esta questão é

facilmente solucionada com a instalação de baterias de condensadores dimensionados com o objectivo de compensarem o factor de potência.

Uma nova restrição que tem vindo a ser estudada é a limitação da variação de energia produzida no tempo, isto é, a determinação de um limite de variação de valor de potencia por minuto, por exemplo. Os valores adoptados são cerca de 30 MW por minuto, 100MW por 10 minutos e 600 MW por hora. O investimento necessário para cumprir este requisito não é elevado, no entanto, limita a produção de energia, diminuindo a taxa de rentabilidade dos parques.

2.5.1. Impactos previsíveis nas redes

Os impactos previstos nas redes de transmissão de energia causados pela interligação de parques eólicos são:

- Variações rápidas e lentas de tensões no sistema;
- Congestionamento de ramos da rede e de subestações;
- Aumento dos níveis de potência de curto-circuito;
- Qualidade da onda:
 - Níveis de flicker;
 - Nível de distorção harmónica;
- Problemas de estabilidade → comportamento dinâmico, estabilidade de tensão;
- Pré-despacho e despacho das unidades convencionais.

2.5.1.1. Resistência a cavas de tensão - *Ride through defaults*

Em áreas com grande penetração de produção eólica, como no caso da Dinamarca e Alemanha, a perda de geração pode causar uma queda de tensão e/ou frequência o que pode levar à ocorrência de situações catastróficas pela queda em cascata da produção.

Os operadores de sistema obrigam a que a produção eólica se mantenha interligada numa situação de colapso de tensão num determinado intervalo de tempo. Isto significa que os aerogeradores permanecerem em funcionamento perante um defeito na rede (abaixamento de tensão). Esta tecnologia baseia-se no princípio de injectar potência reactiva, de forma a garantir que a tensão não baixa. Sendo assim, as protecções não serão actuadas, pelo que a máquina continuará em serviço.

2.5.1.2. Resposta em frequência

Os aerogeradores têm que ter a capacidade de aumentar e diminuir a potência produzida assim como produzir ou absorver potência reactiva em respostas às variações de frequência da rede.

2.5.1.3. Potência reactiva

Sendo a maioria dos aerogeradores constituídos por máquinas assíncronas estes absorvem potência reactiva da rede. Para evitar distúrbios no sistema, as máquinas são obrigadas a ter a capacidade de fornecerem ou absorverem, conforme a necessidade, energia reactiva ao sistema.

Esta exigência pode ser obtida pela instalação de baterias de condensadores ou com novos sistemas de controlo e o uso da electrónica de potência. Exemplo disso é a máquina assíncrona duplamente alimentada que possibilita a obtenção de energia do rotor através do uso de conversores electrónicos.

2.5.1.4. Arranque em rede isolada – *Black Start*

A capacidade de *Black Start* consiste num sistema capaz de isoladamente iniciar a injeção de potência e alimentar cargas de um sistema a funcionar em ilha após um colapso da rede.

No caso de falha da rede MT ou AT a rede pode dividir-se em ilhas, mantendo-se as micro-redes em operação usando os recursos locais e sob o controlo da central de controlo da micro-rede – *Micro Grid Central Controller MGCC* –, do controlador da micro-fonte – *Micro Source Controller MC* –, controlo dos níveis de produção de energia activa e reactiva, e do controlador de carga – *Load Controller LC*. Ou seja, há uma mudança de controlo de potência para controlo de frequência.

As micro-fontes terão que possuir um arranque autónomo para alimentar as cargas locais e os controladores. Para que tal seja possível a micro-rede tem que ter a capacidade de:

- Comunicar bidirecionalmente com o MGCC e LC
- Desligar as cargas após o colapso local da rede
- Armazenar informação sobre o estado de geração e consumo
- Separação da rede de BT da rede de MT
- Assegurar a criação de neutro na rede MT, desligando o transformador MT/BT.

Este requisito não é ainda exigido visto que o funcionamento em modo isolado levanta novas questões a nível dos sistemas de protecção da rede e da sua forma de exploração.

2.6. Resumo

O crescente aumento de consumo de energia no Mundo despertou a investigação e desenvolvimento de novas fontes de energia que promovam a segurança no abastecimento dos consumidores de forma mais segura e sustentável.

Nos últimos anos, a energia eólica transformou-se na fonte de energia renovável em maior expansão no Mundo. Em diversos países, dispersos pelos cinco continentes, surgiram políticas de incentivo aos projectos de parques eólicos e levando ao seu rápido crescimento e progresso da tecnologia empregue.

As alterações a nível da constituição dos sistemas eléctricos implicam a criação de nova regulamentação e diferentes métodos de planeamento e exploração dos sistemas. Novas questões terão que ser abordadas e estudadas com diferentes ferramentas adaptadas ao problema actual.

Capítulo III. A Fiabilidade de Sistemas Eléctricos

3.1. Introdução

O estudo da fiabilidade dos sistemas eléctricos assume especial importância no planeamento e o operação dos sistemas eléctricos.

É através da avaliação das avarias possíveis no sistema eléctrico que são determinadas as reservas adequadas ao sistema para que este se apresente com a qualidade e continuidade de serviço desejadas.

As avarias nos componentes que constituem o sistema eléctrico ocorrem de forma aleatória e por isso a fiabilidade do sistema é “a probabilidade de um sistema ser capaz de desempenhar as suas funções de forma adequada, num dado período de tempo e nas condições de funcionamento especificadas”.

Os estudos de fiabilidade de sistemas, que pretendem determinar qual a capacidade adequada ao sistema, podem ser executados de forma determinística ou probabilística.

As técnicas determinísticas consistem na avaliação de situações consideradas críticas através de uma análise prévia do sistema.

A análise probabilística é capaz de representar a natureza aleatória do sistema eléctrico, considerando um grande conjunto de situações críticas e as suas probabilidades de ocorrência. As metodologias probabilísticas poderão tomar em consideração não só o comportamento probabilístico que caracteriza o sistema produtor como também a evolução do sistema de consumo e as incertezas associadas.

3.2. Conceitos básicos

O comportamento de um componente pode ser caracterizado por diversos parâmetros, nomeadamente o tempo de funcionamento e de avaria. Estes parâmetros caracterizam um determinado estado, associado a uma determinada variável aleatória, em que o componente se pode encontrar. Ao conjunto de estados possíveis em que o componente pode residir, dá-se o nome de espaço amostral.

A variável aleatória atribui um valor a cada estado possível e pode ser classificada como discreta ou como continua. No caso dos estados possíveis serem o estado de

funcionamento e o estado de avaria a variável aleatória tomara, respectivamente, o valor 1 e 0, sendo este um exemplo de uma variável discreta. As variáveis discretas podem assumir um número discreto de estados ao contrário das variáveis contínuas que podem assumir um número infinito de estados, ou seja, de valores.

A cada valor X_i , sendo X_i uma variável discreta, pode ser associada uma determinada probabilidade de ocorrência, em que:

$$\begin{cases} \sum p(X_i) = 1 \\ 0 \leq p(X_i) \leq 1 \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

Ao conjunto de valores $p(X_i)$ chama-se função distribuição de probabilidade $p(X_i)$, sendo a probabilidade de uma variável aleatória se encontrar entre a e b definida por:

$$P(a \leq x \leq b) = \sum_{i=a}^b p(X_i) \quad (\text{III-2})$$

No caso de variáveis aleatórias contínuas, o valor de X_i pode ser associado à função densidade de probabilidade $f(X_i)$, em que:

$$\begin{aligned} f(X_i) &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P[x < X_i \leq x + \Delta x]}{\Delta x} \\ \int_{-\infty}^{+\infty} f(X) dX &= 1 \\ 0 &\leq f(X_i) \leq 1 \end{aligned} \quad (\text{III-3})$$

Assim, a probabilidade de uma variável aleatória contínua X_i se encontrar no intervalo $[a, b]$ será dada pela expressão:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(X) dX \quad (\text{III-4})$$

A função distribuição de probabilidade acumulada $F(x)$ define a probabilidade de uma variável aleatória X ser inferior a X_i , ou seja a função de probabilidade de $F(x)$, dada pela seguinte expressão:

$$F(X) = P(X \leq X_i) \quad (\text{III-5})$$

Para variáveis aleatórias discretas $\rightarrow F(X_j) = \sum_{i < j} p(X_i)$ (III-6)

Para variáveis aleatórias contínuas $\rightarrow F(X_i) = \int_{-\infty}^{X_i} f(X) dX$ (III-7)

A derivada da função distribuição acumulada é designada por função densidade de probabilidade

$$f(X) = \frac{dF(X)}{dX} \quad (III-8)$$

Se a variável aleatória representar o tempo de permanência de um determinado componente num certo estado, podendo ser o estado de funcionamento ou de avaria, a função distribuição acumulada de avaria é dada por:

$$Q(t) = P(X \leq t) \quad (III-9)$$

A expressão número (III-9) define a probabilidade de um determinado componente avariar, e o seu complemento será a função de fiabilidade, ou seja, a probabilidade de um componente funcionar até ao instante t:

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - Q(t) \\ R(t) &= P(X > t) \end{aligned} \quad (III-10)$$

A probabilidade de um componente avariar no instante t, dado que funcionou até esse momento é representada pela função taxa de avaria $\lambda(t)$.

$$\lambda(t) = \frac{\text{Probabilidade de avariar no intervalo } [t, t + \Delta t] \text{ dado que não avariou antes de } t}{\Delta t}$$

(III-11)

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[t < X \leq t + \Delta t \mid X > t]}{\Delta t} \quad (III-12)$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{P[t < X \leq t + \Delta t \cap X > t]}{P[X > t]} \quad (III-13)$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{P[t < X \leq t + \Delta t]}{P[X > t]} \quad (III-14)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{1 - Q(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (III-15)$$

$$\int_1^{R(t)} \frac{dR(t)}{R(t)} = -\int_0^t \lambda(s) ds \Leftrightarrow \ln R(t) = -\int_0^t \lambda(s) ds \quad (III-16)$$

$$\Leftrightarrow R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(s) ds}$$

Considerando $\lambda(t)$ constante para todo o t podem escrever-se as funções $R(t)$ e $Q(t)$ com as seguintes expressões:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{III-17})$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{III-18})$$

Um componente pode ser caracterizado pela probabilidade de se encontrar no estado de funcionamento ou de avaria, pela taxa de avaria e pela taxa de reparação. Estes parâmetros caracterizam os possíveis estados de residência associados a um componente. Cada estado pode ser associado a uma variável aleatória e o conjunto dos diferentes estados forma o espaço amostral.

Um gerador, por exemplo, pode estar no estado de funcionamento com potência igual à sua potência nominal, no estado de funcionamento com potência inferior à sua potência nominal ou no estado de avaria forçada ou programada (situação de manutenção).

Se considerarmos apenas os estados de funcionamento e avaria para um determinado componente, a probabilidade de o componente se encontrar no estado de funcionamento é igual ao tempo de funcionamento por período de tempo enquanto que a probabilidade do componente residir no estado de avaria é igual ao tempo de avaria por período de tempo.

Assim, a taxa de avaria será igual ao inverso do tempo médio de funcionamento e a taxa de reparação será igual ao inverso do tempo médio de reparação.

Definição dos estados

- Estado de funcionamento

- Taxa de avaria λ
- Função densidade de probabilidade: $f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$ (III-19)
- Tempo médio de funcionamento (*MTTF- Mean time to failure*): $m = \frac{1}{\lambda}$ (III-20)

- Estado de avaria

- Taxa de reparação μ
- Função densidade de probabilidade: $f(t) = \mu \cdot e^{-\mu t}$ (III-21)

- Tempo médio de reparação (*MTTR- Mean time to repair*): $r = \frac{1}{\mu}$ (III-22)

A probabilidade de o componente se encontrar fora de serviço é então definida por FOR (Forced Outage Rate):

$$FOR = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{r}{m + r} = \frac{\text{tempo de avaria}}{\text{tempo de avaria} + \text{tempo de funcionamento}} \quad (\text{III-23})$$

Um sistema é composto por vários componentes que podem apresentar-se em estados diferentes.

Conhecendo os componentes que constituem o sistema, bem como os índices de probabilidade a estes associados, é possível modelizar o sistema e estudar o seu comportamento do ponto de vista probabilístico. Isto é, é possível determinar a probabilidade do sistema produtor responder às solicitações, com base na análise da probabilidade acumulada dos diferentes componentes se encontrarem fora de serviço.

3.3. Fiabilidade de sistemas de produção

O sistema eléctrico, de um modo geral, é dividido em três sub-sistemas, o de produção, o de transporte e o de distribuição.

A fiabilidade dos sistemas de produção, transporte e distribuição deve ser tratada de maneira distinta, tendo em conta o modo de exploração de cada um e o grau de importância destes a nível da continuidade e qualidade de serviço esperado.

A análise de fiabilidade dos sistemas de produção deve considerar as diferenças existentes no sistema consoante se pretende realizar um estudo de fiabilidade em regime estático ou em regime girante. Por esse motivo os modelos desenvolvidos para os estudos de fiabilidade dos sistemas de produção são separados nessas duas áreas distintas: capacidade estática e capacidade girante.

A avaliação da capacidade estática, a capacidade instalada, do sistema de produção é importante na determinação a médio e longo prazo da capacidade que se deve instalar no sistema.

A avaliação da capacidade girante, a capacidade disponível para entrar em funcionamento num dado intervalo de tempo, é importante na determinação da reserva girante que o sistema deverá ter para satisfazer o consumo.

Para garantir o abastecimento dos consumos ao longo dos anos, é de extrema importância que o planeamento do sistema seja feito com base nestes dois tipos de

estudos distintos. É necessário saber o quão fiável deverá ser o sistema e qual a sua evolução no período de tempo em estudo de forma a planear correctamente o investimento conveniente e favorável à exploração do sistema produtor.

Neste tipo de estudos é avaliada a probabilidade de saída de serviço dos grupos geradores e qual a sua consequência a nível da alimentação das cargas em jogo. Será a procura do equilíbrio entre o investimento na capacidade instalada e os custos de exploração que permitam a satisfação dos consumos.

Considerando um sistema constituído por diversos grupos geradores que se destinam a alimentar uma determinada carga, a probabilidade de cada um dos grupos se encontrar fora de serviço é dada pela FOR característica de cada um. Os estados possíveis de residência do sistema correspondem a diferentes configurações que o sistema produtor pode assumir tendo em conta as FOR dos grupos que o constituem. A probabilidade de o sistema produtor se encontrar num estado em que a potência produzida não é suficiente para alimentar a carga, ou seja, a capacidade disponível é inferior à carga, é dada pelo somatório das probabilidades de residência nesses estados.

Para uma dado sistema podemos construir a tabela das probabilidades acumuladas que nos dá a probabilidade de uma dada capacidade ou superior estar fora de serviço. Se considerarmos um sistema ao qual é acrescentado um novo gerador, a probabilidade de X MW estarem fora de serviço, após a inclusão da nova unidade, pode ser calculada pela expressão:

$$P(X) = (1 - FOR) \cdot P'(X) + FOR \cdot P'(X - C) \quad (\text{III-24})$$

Nesta expressão $P'(X)$ é a probabilidade acumulada do sistema se encontrar com X MW fora de serviço antes de se incluir no sistema a nova unidade com capacidade C . $P'(X - C)$ é a probabilidade acumulada do sistema se encontrar com $(X - C)$ MW fora de serviço, antes de se incluir no sistema a nova unidade com capacidade C .

Considerando um sistema com n unidades a expressão (III-24) toma a seguinte aparência

$$P(X) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot P'(X - C_i) \quad (\text{III-25})$$

Em que p_i é a probabilidade de o sistema se encontrar no estado i .

Está assim definido o que se designa por COCPT (*“Capacity outage cumulative probability table”*) que representa a probabilidade de encontrar uma determinada capacidade de produção fora de serviço.

Baseado no COCPT é possível definir o LOLP (*“Loss of load probability”*), ou seja a probabilidade de a potência instalada não ser suficiente para alimentar toda a carga.

$$LOLP = P \cdot (C_T - L) \quad (III-26)$$

E o LOLE (*“Loss of load expectation”*) que indica a carga que o sistema não alimentará num dado período de tempo, normalmente de um ano.

$$LOLE = \sum_{i=1}^n P_i \cdot (C_T - L_i) \cdot t_i \quad (III-27)$$

3.4. Processos de Markov

Num conjunto de acontecimentos possíveis de uma experiência, é possível associar a cada acontecimento uma função de tempo, tal que $\{X(t), t \in T\}$, sendo T o parâmetro tempo. A família de funções que daqui resulta é designada por processo estocástico.

Um processo estocástico pode ser contínuo ou discreto consoante as observações sejam feitas continuamente no tempo ou em determinados intervalos de tempo, respectivamente.

Um processo de Markov é um processo estocástico $\{X(t), t \in T\}$ em que para qualquer conjunto de n valores $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ no conjunto de índices e qualquer conjunto $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ de n estados, a probabilidade de uma variável aleatória X_n , no instante t_n , assumir o valor $X_n = X(t_n) = x_n$, é dada por

$$P[X(t_n) = x_n | (X(t_1) = x_1) \cap (X(t_2) = x_2) \cap \dots \cap (X(t_{n-1}) = x_{n-1})] \quad (III-28)$$

$$P[X(t_n) = x_n | (X(t_{n-1}) = x_{n-1})] \quad (III-29)$$

Ou seja, o estado futuro do processo depende somente do estado presente e não de toda a sua história, isto é, o sistema não tem memória.

A segunda condição para que o processo estocástico possa ser representado por um processo de Markov é que a probabilidade de transição entre estados permaneça constante durante o processo. Isto significa que o processo tem que ser um processo

estacionário e o comportamento do sistema mantém-se inalterável ao longo do tempo, independentemente do ponto de partida considerado.

A terceira condição é que os estados possíveis são perfeitamente identificáveis. O espaço de estados é normalmente discreto enquanto que o tempo, índice do processo, pode ser contínuo, neste caso estamos perante um processo de Markov, ou discreto, neste caso será uma cadeia de Markov.

Nos estudo de fiabilidade os sistemas são modelados como sendo discretos no espaço e contínuos no tempo. Os elementos de um sistema eléctrico de energia permanecem num estado até que ocorra a transição para o estado futuro onde se manterão até ocorrer uma nova transição.

No exemplo seguinte, o espaço de estados tem três estados nos quais o componente pode residir. A transição entre estados é definida pela probabilidade de transição, calculada pela expressão (III-30):

$$P[X(t + \Delta t) = j | (X(t) = i)] = p_{ij}(t, \Delta t) \quad (\text{III-30})$$

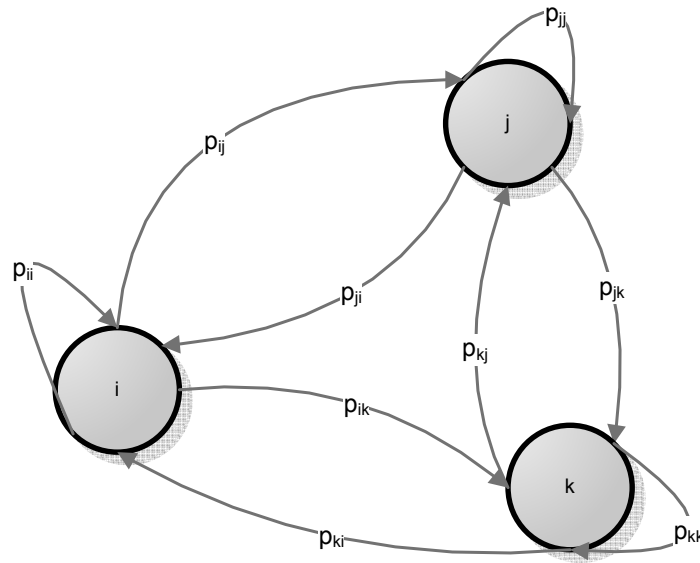


Figura III-1: Cadeia de Markov.

O somatório das probabilidades de abandono de um dado estado para os outros estados possíveis é igual a 1:

$$\begin{cases} p_{ii} + p_{ij} + p_{ik} = 1 \\ p_{ji} + p_{jj} + p_{jk} = 1 \\ p_{ki} + p_{kj} + p_{kk} = 1 \end{cases} \quad (\text{III-31})$$

A probabilidade de transição de estado pode ser definida segundo as expressões seguintes, que são dependentes das taxas de transição q_{ij} e q_{ii} :

$$\begin{cases} p_{ij}(t + \Delta t) = P[X(t + \Delta t) = j | (X(t) = i)] = q_{ij}\Delta t, & i \neq j \\ p_{ii}(t + \Delta t) = P[X(t + \Delta t) = i | (X(t) = i)] = 1 - q_{ii}\Delta t \end{cases} \quad (\text{III-32})$$

$$\begin{aligned} q_{ij} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t} \\ q_{ii} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - p_{ii}(\Delta t)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (\text{III-33})$$

Então:

$$\begin{aligned} p_{ii}(\Delta t) + \sum_{j \neq i} p_{ij}(\Delta t) &= 1 \\ \Rightarrow q_{ii} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \sum_{j \neq i} p_{ij}(\Delta t) = \sum_{i \neq j} q_{ij} \end{aligned} \quad (\text{III-34})$$

A probabilidade de residência num estado pode ser obtida por:

$$p_i(t + \Delta t) = p_i(t) \cdot (1 - q_{ii}\Delta t) + \sum_{j \neq i} p_j(t) \cdot q_{ji}\Delta t \quad (\text{III-35})$$

As probabilidades de transição podem ser apresentadas em forma de uma matriz quadrada chamada Matriz de Probabilidade de Transição $P(\Delta t)$, de dimensão $n \times n$, em que o somatório de cada linha é unitário.

$$P(\Delta t) = \begin{bmatrix} p_{11}(\Delta t) & p_{12}(\Delta t) & \dots & p_{1n}(\Delta t) \\ p_{21}(\Delta t) & p_{22}(\Delta t) & \dots & p_{2n}(\Delta t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1}(\Delta t) & p_{n2}(\Delta t) & \dots & p_{nn}(\Delta t) \end{bmatrix} \quad (\text{III-36})$$

De igual forma, é possível definir a matriz de transição de estados A, de dimensão $n \times n$, em que o somatório de cada linha é nulo:

$$A = \begin{bmatrix} -q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & -q_{22} & \dots & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{n1} & q_{n2} & \dots & -q_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{III-37})$$

E assim:

$$A = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot [P(\Delta t) - I] \quad (\text{III-38})$$

$$\dot{p}(t) = p(t) \cdot A$$

em regime permanente $p(t) \cdot A = 0$ (III-39)

A maioria da vezes admite-se que um elemento do sistema eléctrico de energia pode residir em dois estado diferentes, o estado de funcionamento e o estado de avaria.

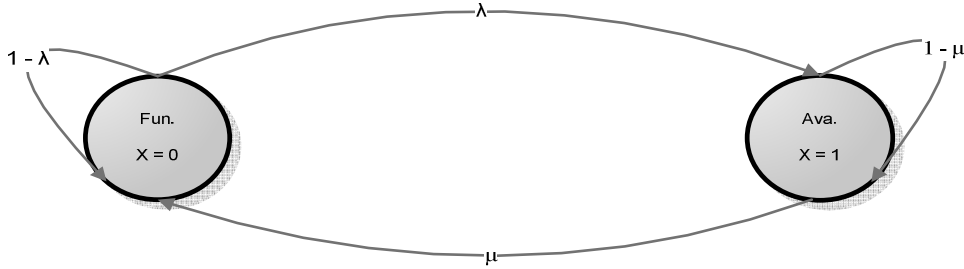


Figura III-2: Diagrama de Markov de um componente eléctrico.

As taxas de abandono dos estados de funcionamento e avaria são a taxa de avaria (número de avarias por ano) e a taxa de reparação (número de reparações por ano), respectivamente, e a probabilidade de permanência num determinado estado é representada por uma distribuição exponencial .

$$\begin{cases} p_0(t+dt) = p_0(t) \cdot (1 - \lambda \cdot dt) + p_1(t) \cdot \mu \cdot dt \\ p_1(t+dt) = p_0(t) \cdot \lambda \cdot dt + p_1(t) \cdot (1 - \mu \cdot dt) \end{cases} \quad (\text{III-40})$$

$$\begin{bmatrix} p_0(t+\Delta t) \\ p_1(t+\Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \lambda \cdot \Delta t & \mu \cdot \Delta t \\ \lambda \cdot \Delta t & 1 - \mu \cdot \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \end{bmatrix} \quad (\text{III-41})$$

$$P(t+\Delta t) = S(\Delta t) \cdot P(t) \quad (\text{III-42}),$$

em que $S(\Delta t)$ é a matriz estocástica de transição de probabilidades.

Considerando como condições iniciais $p_0(0)=1; p_1(0)=0$ as probabilidades limite podem ser calculadas como:

$$\begin{bmatrix} p_0(1) \\ p_1(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \lambda & \mu \\ \lambda & 1 - \mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III-43})$$

A probabilidade limite pode ser obtida pelo cálculo de sucessivas iterações que terminarão quando a probabilidade do estado seguinte $P(t + \Delta t)$ for igual à do estado anterior $P(t)$ que corresponde à determinação dos estados absorventes. Os estados absorventes são aqueles que, uma vez atingidos, não podem ser abandonados até que seja reiniciado o sistema, o que implica $P'(t) = 0$ e:

$$\begin{bmatrix} p_0(t + \Delta t) \\ p_1(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \lambda \cdot \Delta t & \mu \cdot \Delta t \\ \lambda \cdot \Delta t & 1 - \mu \cdot \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \end{bmatrix} \quad (\text{III-44})$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} p'_0(t) \\ p'_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ \lambda & -\mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \end{bmatrix} \quad (\text{III-45})$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ \lambda & -\mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \end{bmatrix} \quad (\text{III-46})$$

O sistema anterior é um sistema de equações possível indeterminado que pode ser resolvido incluindo a seguinte equação: $p_0 + p_1 = 1$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ \lambda & -\mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \end{bmatrix} \\ p_0 + p_1 = 1 \end{array} \right. \quad (\text{III-47})$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \end{bmatrix} \\ - \end{array} \right. \quad (\text{III-48})$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \end{bmatrix} \\ - \end{array} \right. \quad (\text{III-49})$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \end{bmatrix} \\ - \end{array} \right. \quad (\text{III-50})$$

Podemos então escrever:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_3 \end{bmatrix} = [I - S]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III-51})$$

Com a expressão anterior é possível calcular a probabilidade do sistema residir em cada um dos estados possíveis.

No caso do sistema corresponder a um único componente, que pode residir no estado de funcionamento ou no estado de avaria, as probabilidades de residência em cada um dos estados, representam as probabilidades de disponibilidade e indisponibilidade do componente. Em sistemas mais complexos, associando cada um dos estados possíveis à potência disponível, consoante o número de componentes em serviço que caracterizam, é possível calcular a probabilidade de o sistema se encontrar a produzir a potência X , por exemplo.

3.5. Índices para avaliação de fiabilidade

Conhecendo as probabilidades de residência do sistema em cada um dos cenários, que representam um determinado estado, a caracterização e avaliação do sistema pode ser feita pelas taxas de indisponibilidade obtidas e pelos índices de fiabilidade associados.

No âmbito deste trabalho, para avaliar o comportamento e desempenho do parque eólico em estudo, foram definidos os índices que avaliam a energia gerada pelo parque eólico, descritos em seguida.

A potência eléctrica instalada – *Installed Wind Power IWP* – corresponde ao somatório das potências nominais de todos os aerogeradores que constituem o parque.

Multiplicando o índice anterior pelo número de horas existentes num ano, 8760h, obtém-se o valor da energia máxima que pode ser produzida pelo parque eólico num ano, isto é a energia eólica instalada – *Installed Wind Energy IWE*.

$$IWE = IWP \cdot 8760 [MWh] \quad (III-52)$$

Durante um ano, a energia disponível no recurso eólico será o tecto para a produção efectiva do parque eólico. Define-se, assim, o índice que representa a energia prevista disponível no vento num ano – *Expected Available Wind Energy EAWE* –, que é obtido desprezando todas as saídas forçadas ou programadas dos aerogeradores, ou seja, todos os aerogeradores que constituem o parque estarão permanentemente em serviço.

Ao considerar as saídas forçadas dos aerogeradores obtém-se o índice de energia prevista gerada – *Expected Generated Wind Energy EGWE* – que permite avaliar a quantidade expectável de energia gerada pelo parque eólico.

A razão entre *EGWE* e *IWE* será o factor de disponibilidade do parque eólico – *Wind Generation Availability Factor WGAF* –, a fatia de energia expectável produzida de toda a energia possível de converter a partir do recurso disponível.

$$WGAF = \frac{EGWE}{IWE} \quad (III-53)$$

A razão entre *EAWE* e *IWE* será o factor de capacidade do parque eólico – *Capacity Factor FC* –, a energia máxima possível de produzir a partir do recurso disponível.

$$FC = \frac{EAWE}{IWE} \quad (III-54)$$

3.6. Resumo

Os estudos de fiabilidade dos sistemas eléctricos visam a definição de índices de fiabilidade que caracterizam o sistema em estudo com base em dados estatísticos que pretendem representar o comportamento dos diversos componentes. A qualidade da amostra com base na qual são obtidos os dados estatísticos, tem assim um papel preponderante nos resultados finais.

Vários modelos matemáticos têm sido adoptados e desenvolvidos em redor de diversos parâmetros que definem a qualidade de serviço e a fiabilidade exigida para cada sistema.



O método e procedimentos de estudo a adoptar devem ter em conta o tipo de sistema e serem adequados ao grau de fiabilidade e precisão requeridas.

Capítulo IV. O Programa Desenvolvido

4.1. O algoritmo

A modelização do parque eólico por processos de Markov, parte do princípio que cada aerogerador tem dois estados possíveis em que pode residir, o estado de funcionamento e o estado de avaria.

No entanto, a produção de energia de um parque eólico não é apenas dependente da taxa de avaria do aerogerador, mas de muitos outros factores que afectam todos os componentes do sistema que constitui o parque eólico e do recurso eólico disponível ao longo do tempo.

De facto, não basta apenas assegurar que todos os componentes do sistemas se encontrem operacionais para garantir a produção de energia, é necessário que o recurso disponível se encontre dentro dos limites mínimo e máximo que permitem a operação do sistema.

O modelo de fiabilidade desenvolvido neste trabalho tem como base a possibilidade de mudança de estado tendo em conta o desempenho dos aerogeradores, que constituem o parque eólico, as suas taxas de disponibilidade e indisponibilidade e a variação do recurso disponível, o vento.

No modelo desenvolvido, a transição entre estados possíveis pode ocorrer por avaria ou reparação de um aerogerador e pela variação da velocidade do vento no local. Ou seja, são consideradas as taxas de avaria e reparação que caracterizam os aerogeradores e as taxas de transição entre diferentes velocidades de vento.

4.2. Modelização do comportamento do aerogerador

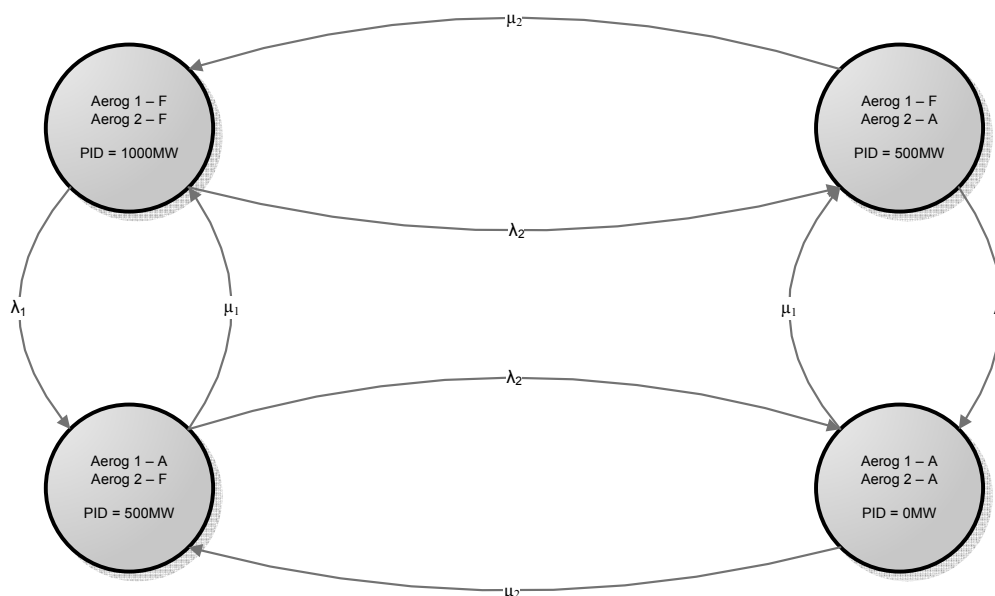
Como referido anteriormente, o aerogerador é modelizado como podendo residir em dois estados distintos caracterizados pela probabilidade de estar operacional ou fora de serviço, respectivamente, tal como referido no Capítulo III: *“Se considerarmos apenas os estados de funcionamento e avaria para um determinado componente, a probabilidade de o componente se encontrar no estado de funcionamento é igual ao tempo de funcionamento por período de tempo enquanto que a probabilidade do componente residir no estado de avaria é igual ao tempo de avaria por período de tempo.”*

A taxa de abandono do estado designado de estado de funcionamento corresponde à taxa de avaria enquanto que a taxa de retorno a esse mesmo estado será a correspondente à taxa de reparação.

Um parque eólico com dois aerogeradores, com potência nominal de 500MW, será constituído por quatro estados distintos, ou seja $2^{n^{\circ} \text{ de aerogeradores}}$. Cada estado corresponde a um cenário em que o sistema pode residir, podendo estar os dois aerogeradores em funcionamento ou apenas um ou os dois fora de serviço.

Consideremos o estado inicial, ou de repouso, o estado em que ambas as máquinas se encontram em perfeitas condições de produzir. Se uma delas tiver um defeito podemos transitar para dois estados possíveis. Em ambos estes estados apenas um aerogerador estará operacional enquanto que o outro estará fora de serviço. A probabilidade de transição do estado inicial para os estados de avaria é caracterizada pela taxa de avaria da máquina que sofreu o defeito.

Se o sistema residir num estado em que apenas um aerogerador está operacional há outras duas hipóteses de transição: ou avaria a máquina que está em funcionamento ou a que se encontra fora de serviço é reparada. No primeiro caso a taxa de transição é caracterizada novamente pela taxa de avaria da máquina enquanto que a transição do segundo caso corresponde à taxa de reparação. O diagrama de Markov, correspondente ao exemplo enunciado, é apresentado na figura IV-1.



Legenda:

- F – Aerogerador em serviço
- A – Aerogerador fora de serviço
- PID – Potência Instalada disponível para produção

Figura IV-1: Diagrama de Markov de um sistema com dois geradores iguais.

As saídas de serviço dos aerogeradores correspondem a saídas forçadas, por motivo de avaria de um ou mais componentes constituintes da máquina que impeçam a operação do mesmo, ou a saídas programadas para manutenção.

As saídas programadas, para além de serem previamente consideradas na estimativa de geração, podem ser previstas para períodos de tempo em que se estima que o recurso eólico será mínimo e por esse motivo não influenciarão tanto a caracterização da disponibilidade da máquina quanto as saídas forçadas.

A taxa de disponibilidade, ou taxa de operação de um aerogerador, representa a capacidade que a máquina tem de operar quando há recurso eólico disponível, ou seja, representa a fiabilidade da máquina, e pode ser calculada pela razão entre o tempo em que se encontra disponível para funcionar e o tempo total, isto é, o período em estudo.

Considerando o período de um ano, a taxa de avaria será o número de saídas de serviço verificadas neste período de tempo por número total de horas em serviço do parque eólico nesse mesmo período.

$$\lambda = \frac{N_f}{h_s} \cdot 8760 \quad (\text{IV-1})$$

A taxa de reparação será o tempo médio de reparação, que depende da complexidade da avaria, de factores climatéricos, etc. ..., por número total de horas em serviço do parque eólico nesse mesmo período.

$$\mu = \frac{t_{rep}}{h_s} \cdot 8760 \quad (\text{IV-2})$$

Deste modo é possível modelar um parque eólico com n aerogeradores, em que cada um deles se pode encontrar em situação de funcionamento, disponível para produzir, ou em situação de avaria, fora de serviço. Neste caso, o diagrama de Markov terá 2^n estados possíveis.

4.3. Modelização do comportamento do recurso eólico

Nos últimos anos, com o desenvolvimento das técnicas e modelos de previsão e controlo, a energia eólica tem vindo, a pouco e pouco, a perder a característica e intermitência que lhe é típica. A modelização do comportamento do vento surge como uma variável cuja importância se deve à variação da quantidade de energia cinética

disponível e possível de se transformar em energia eléctrica, associada ao movimento de da massa de ar em questão.

Os aerogeradores são caracterizados por uma curva de potência a qual define os limites mínimo e máximo de velocidade de vento em que a máquina poderá operar e transformar a energia contida no vento em energia eléctrica. Significa que na presença de velocidades de vento muito baixas ou excessivamente elevadas não haverá produção de energia, quer por falta de recurso eólico quer por motivos de segurança da integridade da máquina.

A velocidade do vento é variável ao longo do dia e do ano, tal como referido anteriormente no Capítulo II. Nos parques eólicos são, normalmente, instalados diversos anemómetros em estações meteorológicas e nas próprias *nacelles* dos aerogeradores. Estes aparelhos medem e registam a velocidade do vento, a sua direcção e sentido em intervalos de tempo pré-definidos, normalmente de 10 em 10 minutos. Esses valores são recolhidos pelo SCADA do parque eólico.

Quando se pretende modelizar o recurso eólico disponível no aerogerador, deve-se ter em consideração os intervalos de tempo entre os registos assim como a localização do anemómetro, nomeadamente a altura do solo a que se encontra.

Os registos de medição de vento recolhidos no local do parque eólico caracterizam o recurso disponível com base nas velocidades e direcções de vento verificadas no local. Estes registos, usualmente recolhidos em intervalos de 10 minutos, possibilitam a avaliação do comportamento do vento num dado período e, com base nestes, é possível avaliar os respectivos desempenhos apresentados pelas diversas máquinas.

A variação da velocidade de vento também pode ser modelizada por um processo de Markov. Neste caso, o estado será caracterizado pelo valor da curva de potência característica da máquina que correspondente ao recurso disponível nesse momento.

No âmbito deste trabalho, de forma a diminuir o tempo de processamento do modelo implementado, é conveniente tratar e transformar a curva de vento obtida, por exemplo ao longo de um ano de registos, de forma a serem definidos escalões de velocidade de vento que caracterizem o recurso medido. Deste modo diminui-se o número de estados possíveis de ocorrer.

A definição do número de patamares e respectivos valores a adoptar, deve ser sensível às variações de vento ocorridas durante o período de tempo em análise e, assim, reproduzirem o mais fielmente possível o comportamento do recurso eólico disponível no parque eólico em questão.

4.3.1. Definição dos níveis de vento e cálculo das respectivas taxas de transição

O agrupamento das velocidades de vento tem como finalidade aligeirar o processo de cálculo criando um menor número de estados possíveis em que o sistema a estudar pode residir.

O algoritmo implementado baseia-se no algoritmo do método estatístico K-means [12], que em sucessivas iterações permite avaliar as próprias variáveis do problema e agrupá-las.

Começa-se por definir o número de estados de vento pretendido e atribui-se, a cada um dos grupos, um dos valores constantes nos registos de velocidades de vento medidos.

Na primeira iteração, todos os valores constantes no registo de velocidades de vento em estudo são subtraídos a cada um dos elementos constantes em cada estado de vento. Cada velocidade de vento será integrada no grupo correspondente ao mínimo do módulo da diferença obtida.

$$Estados_vento = [v_1; v_2; v_3; \dots; v_n] \quad (IV-3)$$

$$Velocidades_vento = [r_1; r_2; r_3; \dots; r_n] \quad (IV-4)$$

$$\min = |v_k - r_i| \quad (IV-5)$$

Nas iterações seguintes, a diferença será feita, novamente entre todos os valores constantes no registo de velocidades de vento em estudo e a média ponderada dos valores que integraram cada um dos grupos na iteração anterior.

$$v_k^{n+1} = \frac{\sum(r_{ik})}{n_k} \quad (IV-6)$$

O processo iterativo cessa quando a diferença entre o valor das médias ponderadas de cada grupo na iteração n e $n+1$ for menor que um determinado erro definido, a precisão pretendida.

Agrupados os valores de velocidade de vento e calculadas as médias que representam cada estado de vento estão definidos os estados em que o sistema pode residir tendo em conta o recurso disponível. Cada um destes estados é caracterizado por uma velocidade de vento $x[m/s]$, um patamar de velocidade.

A transição entre estes estados será caracterizada pelas taxas de transição entre eles. As taxas de transição serão iguais ao quociente entre o número de transições existentes entre o estado inicial e o estado final e a permanência no estado inicial.

$$t_{if} = \frac{n^{\circ} \text{ de transições ocorridas de } i \text{ para } j}{\text{duração da residência em } i} \quad (\text{IV-7})$$

Partindo de um determinado estado de vento é possível transitar para qualquer um dos outros estados, sendo a taxa de transição calculado segundo a expressão (IV-7). Na figura IV-2 está representado o diagrama de estados de vento possíveis, de dimensão $n_{\text{estados de vento}}$, e as respectivas transições.

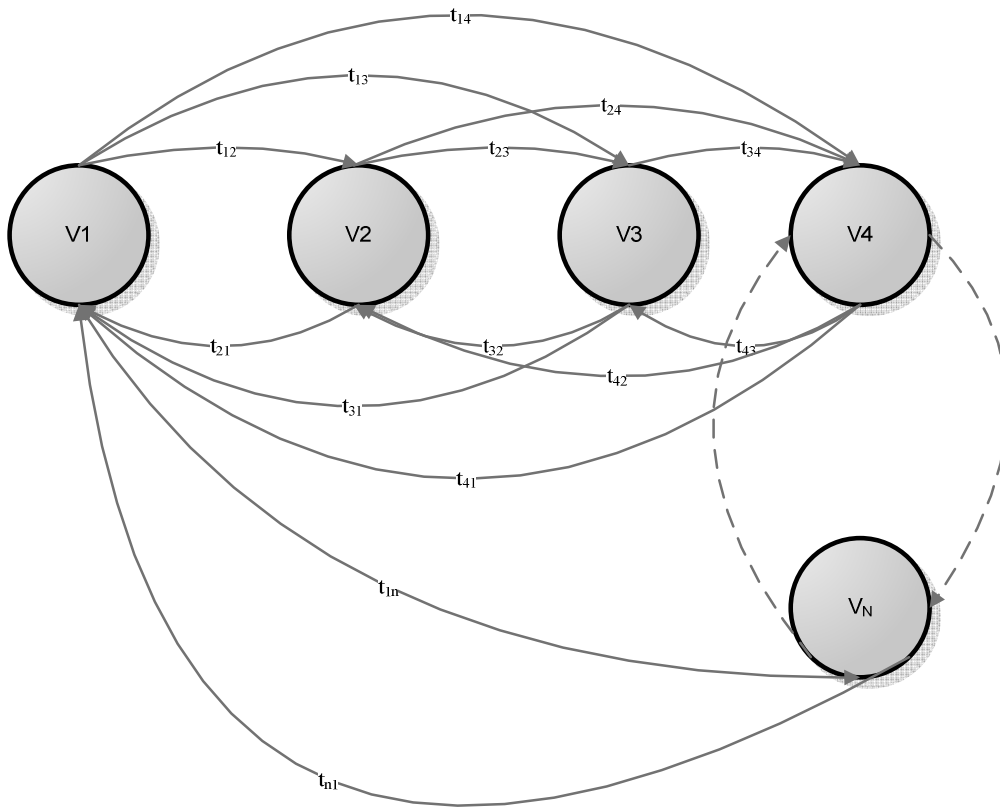


Figura IV-2: Diagrama de Markov que modeliza as variações do recurso eólico.

4.4. Modelização do comportamento dos aerogeradores e do recurso eólico

Os diagramas apresentados nos pontos anteriores, 4.2 e 4.3, têm, respectivamente, dimensões $2^{n^{\circ} \text{ de aerogeradores}}$ e $n_{\text{estados de vento}}$. Combinando o diagramas de estados obtido

para a modelização do vento com o obtido para a modelização dos aerogeradores obtém-se um diagrama de Markov com $2^{n^{\circ \text{ de aerogeradores}}} \times n_{\text{estados de vento}}$ estados possíveis.

Neste diagrama a transição entre estados pode ocorrer por variação da velocidade de vento disponível ou por avaria dos aerogeradores. Todos os cenários possíveis de ocorrer no sistema, quer por avaria de máquinas quer por alteração do recurso disponível, estão modelizados pelo diagrama de estados.

Cada estado é caracterizado pela velocidade de vento, pelas máquinas que se encontram em estado de funcionamento ou em estado de avaria e pela potência disponível, correspondente ao ponto da curva de potência característica da máquina para o patamar de vento desse estado.

Tal como pode ser observado na figura IV-3, considerando o estado inicial aquele em que todos os aerogeradores estão em funcionamento existem duas possibilidades de transição: a transição para um estado caracterizado pela mesma velocidade de vento mas com avaria de um dos aerogeradores ou a transição para um estado caracterizado por uma velocidade de vento diferente com todos os aerogeradores em funcionamento.

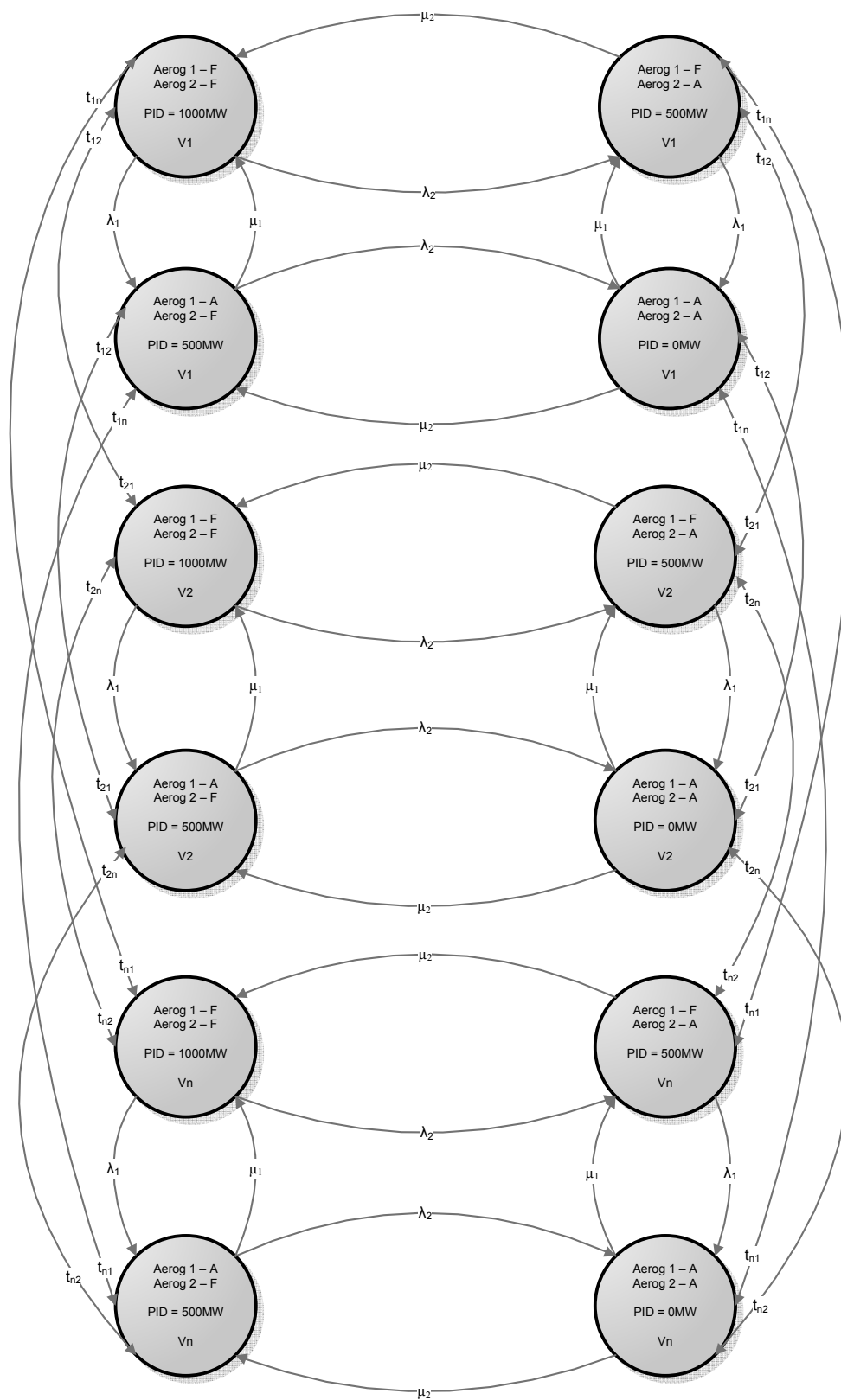


Figura IV-3: Diagrama de Markov que modeliza os aerogeradores e as variações do recurso eólico.

4.5. O Programa

O programa desenvolvido para apoiar o cálculo exigido neste tipo de problemas foi feito no software Matlab. A escolha recaiu sobre a facilidade de manuseamento e operações com matrizes.

O problema de cálculo dos índices de fiabilidade do sistema foi dividido em funções distintas. Os dados de entrada introduzidos são a curva de vento obtida no período de um ano, o número de aerogeradores que constituem o parque eólico em questão e a respectiva curva de potência característica. Os dados são tratados e é feita a definição dos estados possíveis em que o sistema pode residir. A modelização do recurso disponível e dos aerogeradores é obtida tal como referido nos pontos 4.2 e 4.3.

A primeira função implementada tem como objectivo definir os estados de vento a considerar e calcular as respectivas taxas de transição entre estados de vento possíveis. Calcula e agrupa os registos de vento inseridos nos diversos patamares de vento definidos segundo o algoritmo K-means [12]. De seguida o programa calcula as taxas de transição entre os estados de vento acabados de definir pela expressão (IV-7). Cada um dos estados de vento será ainda caracterizado pela potência que cada aerogerador poderá produzir com aquela velocidade de vento.

Seguidamente, o programa desenvolvido define a matriz de transição de estados dos aerogeradores com base nas suas taxas de avaria e reparação.

Modelizado o recurso disponível e os aerogeradores instalados no caso de estudo é criada a matriz de transição de estados interligando ambas as modelizações. Define-se a matriz de dimensão $2^{n^{\circ} \text{ de aerogeradores}} \times n_{\text{estados de vento}}$ que contém todos os estados e respectivas transições entre estados, que modelizam o comportamento do sistema em estudo.

Esta matriz é em tudo idêntica à matriz de transição de estados entre aerogeradores mas considerando que os aerogeradores podem não só transitar de estado em função das taxas de avarias e reparação como também em função das taxas de transição entre estados de vento, i.e., pela variação da velocidade de vento ao longo do tempo.

A última função implementada determina a probabilidade de residência em cada um dos estados possíveis. O programa resolve o sistema de equações, através da função (III-51), e calcula as probabilidades de residência em cada estado.

Por fim, são calculados os índices de fiabilidade, definidos no Capítulo III (ponto 3.1.5), que servirão para posterior análise do desempenho do parque eólico.

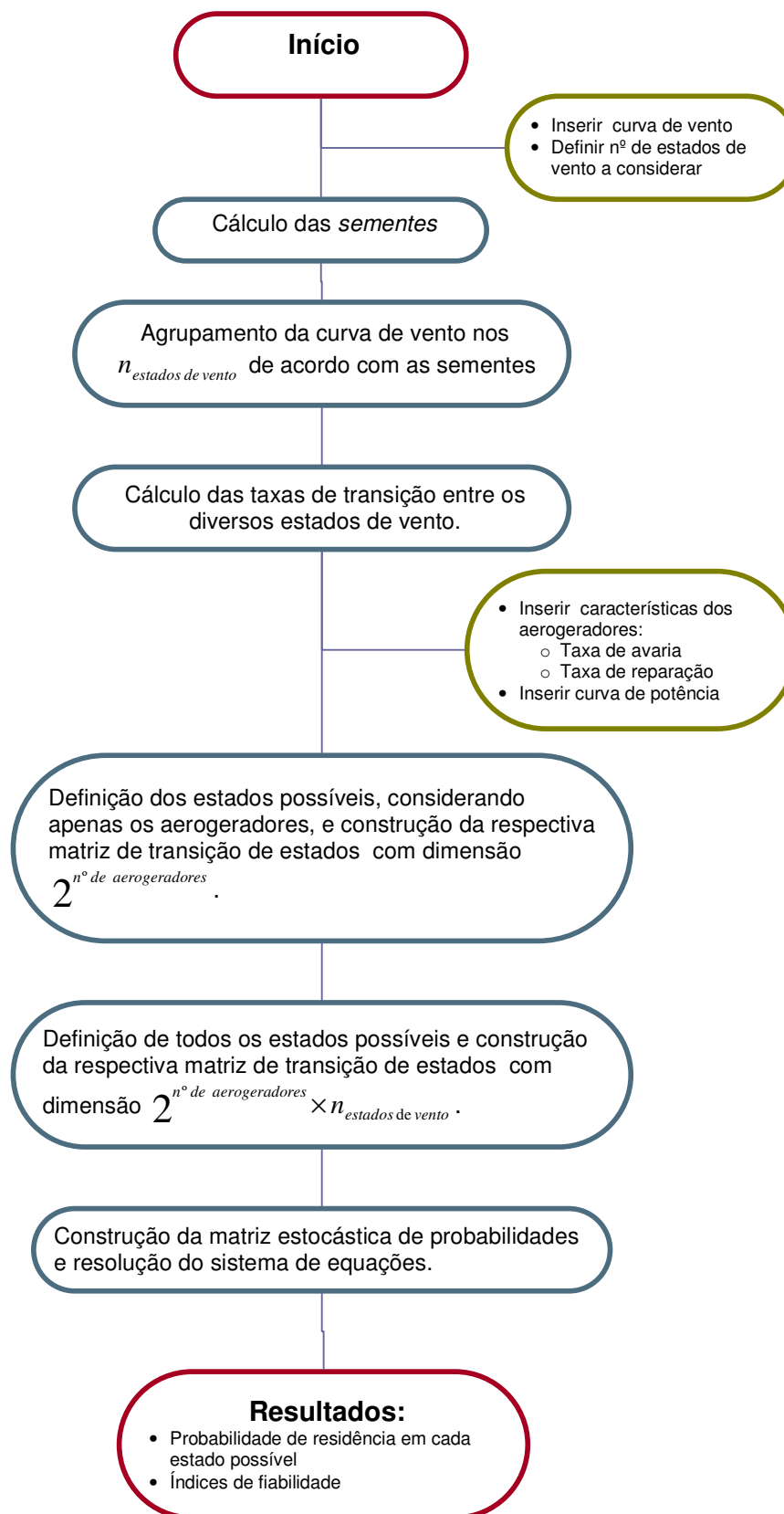


Figura IV-4: Fluxograma do programa.

4.6. Caso de estudo

4.6.1. Apresentação

O parque eólico estudado situa-se no Norte do País. É constituído por dois aerogeradores da marca REpower [I.13], modelo MM82, de 2000 kW cada, com as seguintes características [17]:



- Potência nominal – 2000 kW
- Diâmetro do rotor – 82 m
- Densidade do ar – 1245 kg/m^3
- Limite inferior de velocidade – 3 m/s
- Limite superior de velocidade – 25 m/s

Figura IV-5: Aerogerador MM82.

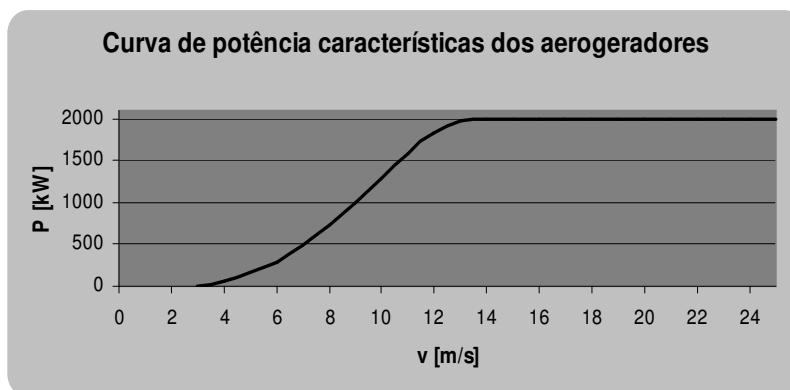


Figura IV-6: Curva de potência do aerogerador MM82.

O parque eólico está munido de anemómetros convenientemente colocados que registam quer a velocidade quer a direcção do vento a que cada um dos aerogeradores está sujeito. Os registos efectuados ao longo dos meses dos anos de 2005 e 2006, por períodos de 10 minutos, encontram representados nas figuras número IV-7 a IV-10:

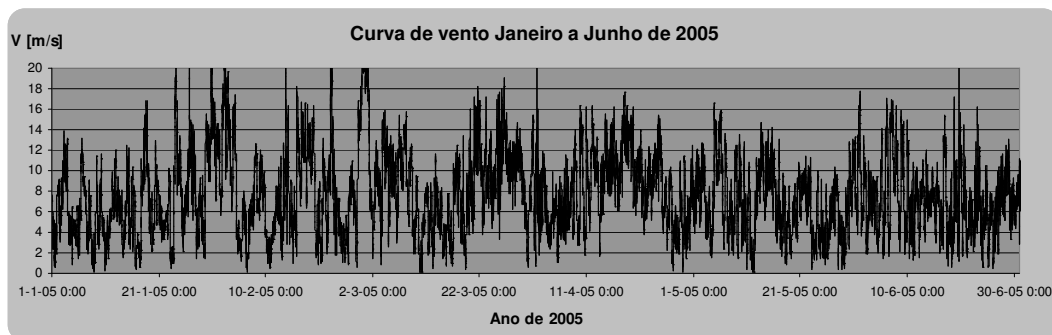


Figura IV-7: Curva de vento – valores registados entre 1 de Janeiro e 31 de Julho de 2005.

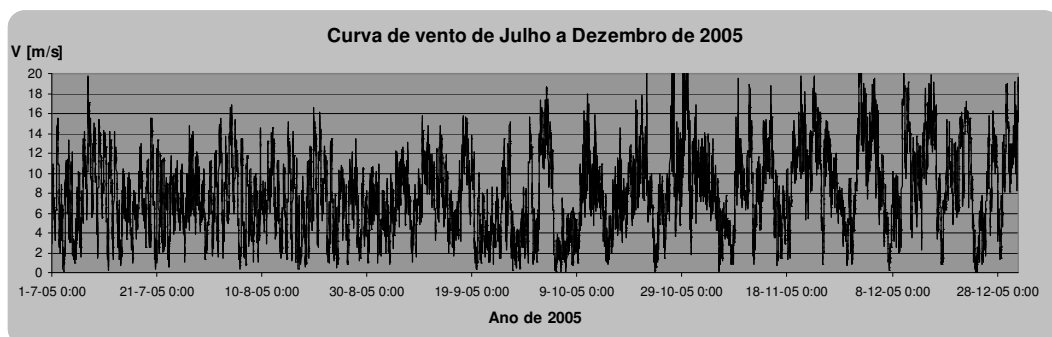


Figura IV-8: Curva de vento – valores registados entre 31 de Julho e 31 de Dezembro de 2005.

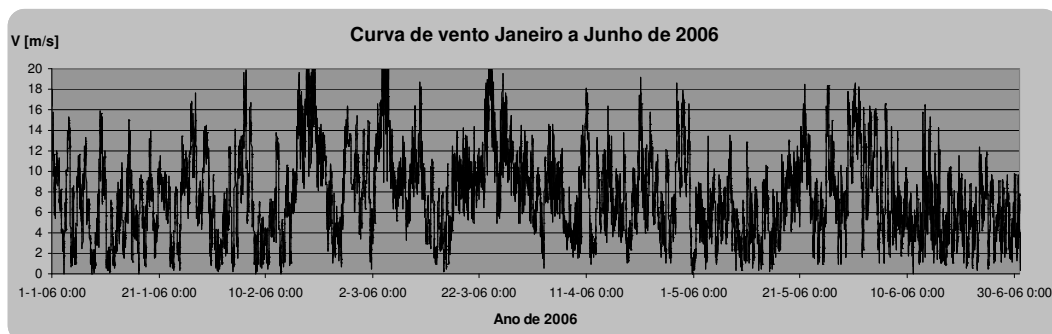


Figura IV-9: Curva de vento – valores registados entre 1 de Janeiro e 31 de Julho de 2006.

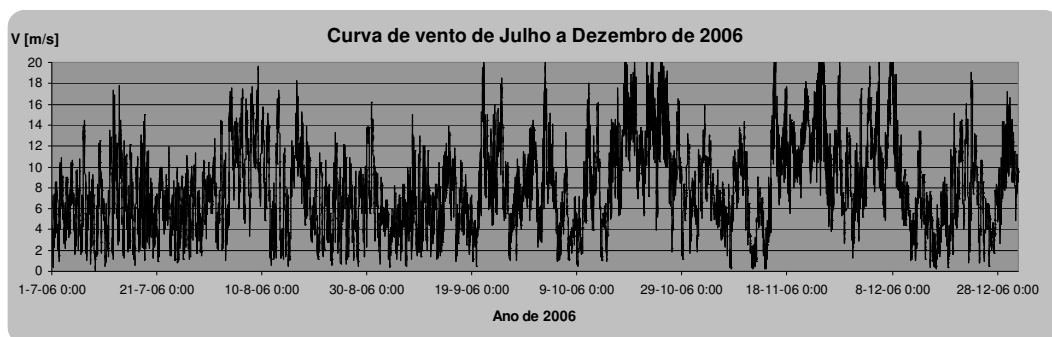


Figura IV-10: Curva de vento – valores registados entre 31 de Julho e 31 de Dezembro de 2006.

A distribuição de *Weibull* [13] é aquela que melhor representa o comportamento da velocidade do vento presente num determinado local. A função densidade de probabilidade de *Weibull* é definida pela expressão:

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A} \right)^k} \quad (\text{IV-8})$$

$$F_w = e^{-\left(\frac{v}{A} \right)^k} \quad (\text{IV-9})$$

O recurso eólico disponível no ano de 2006 pode ser representado pela curva de distribuição de *Weibull* de factor de forma $k = 2,16$ e factor de escala $A \text{ [m/s]} = 8,9$, tal como representado na figura IV-11:

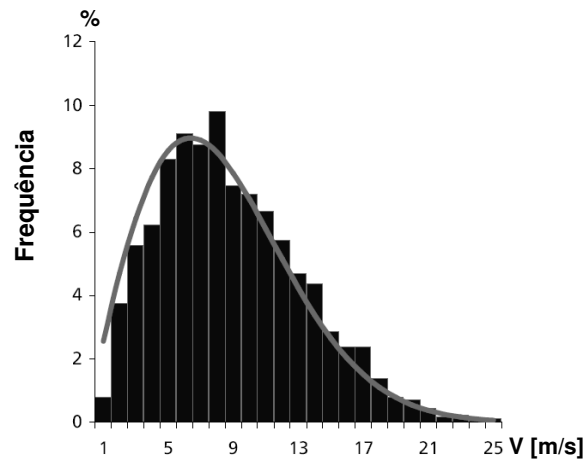


Figura IV-11: Curva de probabilidade acumulada e distribuição de Weibull do parque eólico em estudo – ano 2006.

4.6.2. O cálculo

A determinação dos índices de fiabilidade do parque eólico em estudo foram efectuados através do programa de cálculo implementado em Matlab. Foram testados vários cenários, por períodos de um ano, com diferentes estados possíveis de residência do sistema.

O sistema, constituído por dois aerogeradores, será modelizado por um diagrama de Markov. Os estados possíveis em que o sistema pode ser encontrado compreende não só a combinação dos estados em que as máquinas podem residir, de avaria ou de funcionamento, como também inclui os diversos estados possíveis de recurso eólico disponível, determinados pelas velocidades de vento que podem ocorrer.

Os aerogeradores podem encontrar-se no estado de funcionamento ou de avaria, sendo as taxas de transição entre estes estados definidas pelas taxas de reparação e avaria características das máquinas em estudo.

Tal como mencionado anteriormente, os registos de vento obtidos nas medições efectuadas ao longo de cada ano serão agrupados em diversos estados de vento para facilitar o processamento do programa. O número de estados de vento pretendidos é um dos dados de entrada do programa e, visto que o número de aerogeradores é fixo e igual a 2, determina o número total de estados possíveis do diagrama de Markov construído para modelizar o sistema $-2^{n^{\circ \text{ de aerogeradores}}} \times n_{\text{estados de vento}} = 2^2 \times n_{\text{estados de vento}}$.

Os registos de vento efectuados ao longos dos anos de 2005 e 2006, de 10 em 10 minutos, foram gravados em dois ficheiros de excel, um para cada ano. Dos valores obtidos através do SCADA do parque em estudo foi necessário eliminar os registos que, apesar de a sua ocorrência não ser significativa (< 1%), não foram validados pelo sistema, devido a um qualquer erro ocorrido durante a sua medição.

No início do programa é identificado o ficheiro com a curva de vento do ano que se pretende estudar bem como o número de estados de vento com que o sistema vai ser caracterizado.

Nas figuras número IV-12 e IV-13 encontra-se representada a curva que reúne os registos de vento medidos no parque eólico. Sobreposta a esta temos a representação das curvas que obtemos após o agrupamento dos registos de vento nos diferentes patamares que definem os n estados de vento possíveis.

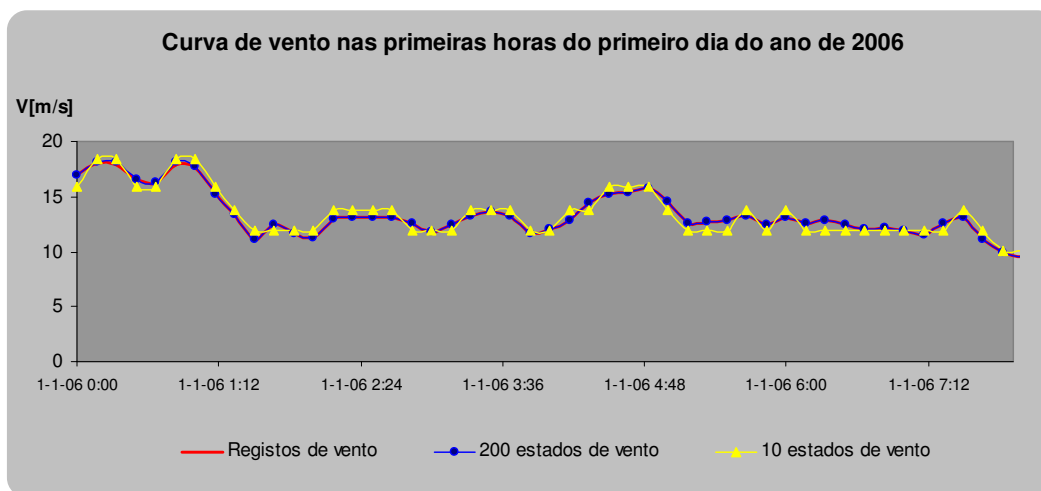


Figura IV-12: Curva de vento das 00h00 às 8h00 do dia 1 de Janeiro de 2006 registada no parque eólico em estudo.

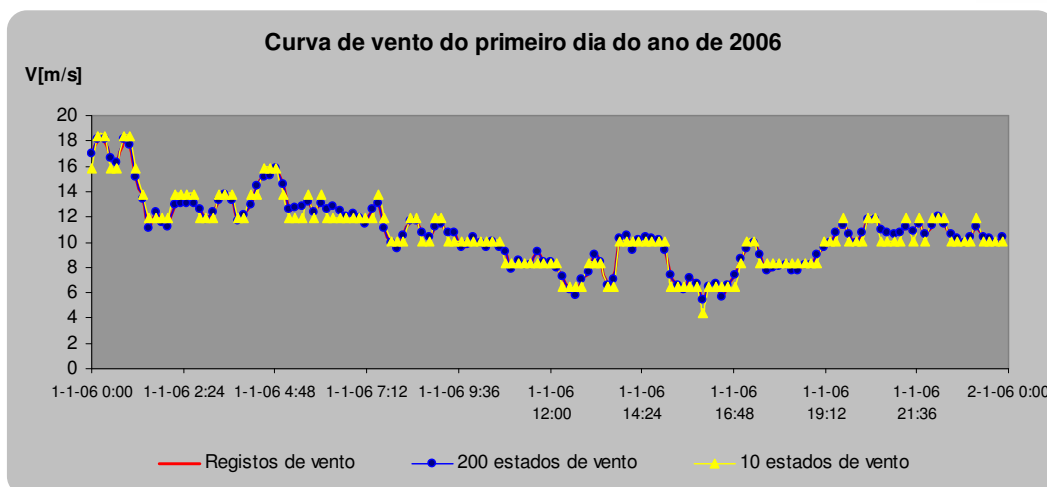


Figura IV-13: Curva de vento das 00h00 às 24h00 do dia 1 de Janeiro de 2006 registada no parque eólico em estudo.

Quando são definidos 200 estados de vento, ou seja, 200 patamares de vento possíveis de ocorrer no sistema, a nova curva obtida modeliza correctamente a curva real. Como pode ser observado, esta acompanha a curva de registos de vento ao contrário do que se observa quando apenas são considerados 10 estados de vento.

Nos gráficos IV-14 e IV-15 é possível comparar os diversos patamares obtidos quando definidos entre 10 a 200 estados de vento. Por análise destes gráficos, verifica-se que quanto maior for o número de estados de vento considerados mais suaves são as diferenças entre os patamares e assim a modelização da curva real será mais precisa.

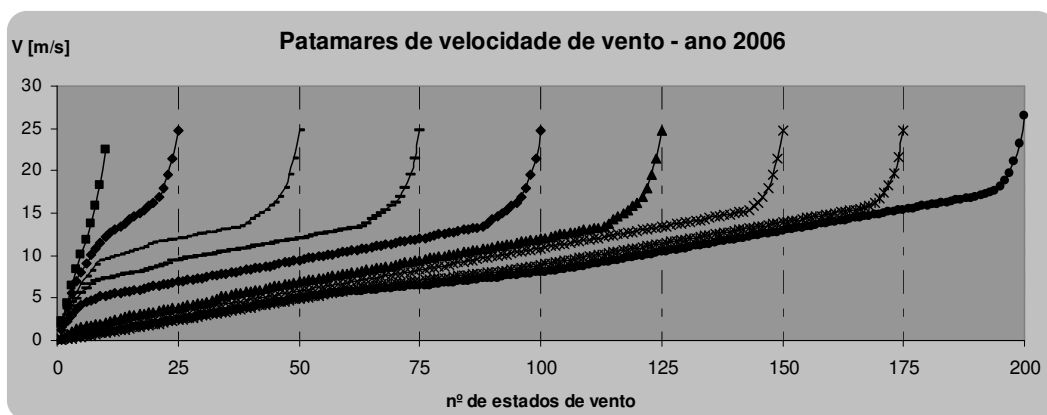


Figura IV-14: Patamares de vento calculados para modelizar a curva de vento de 2006 em diferentes números de estados pretendidos.

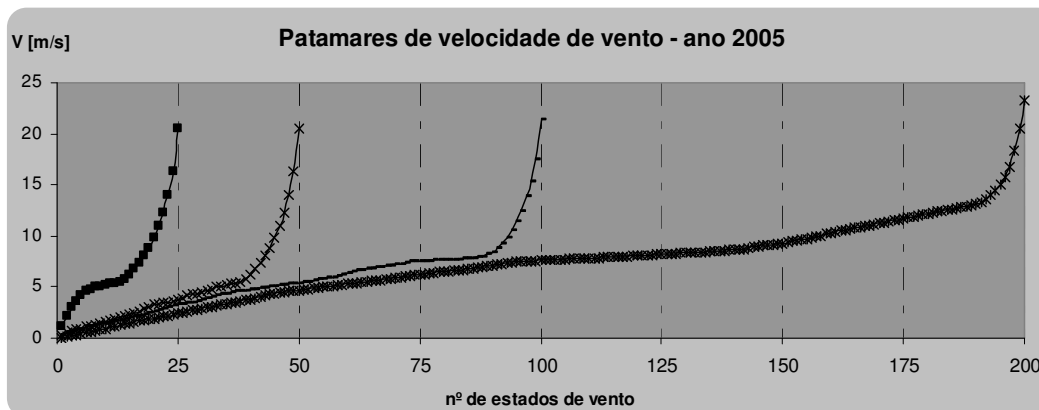


Figura IV-15: Patamares de vento calculados para modelizar a curva de vento de 2005 em diferentes números de estados pretendidos.

Os valores de velocidade de vento obtidos no cálculo serão associados ao ponto da curva de potência dos aerogeradores com a abcissa mais próxima do valor da velocidade de vento de cada patamar. A curva de potência encontra-se definida para 30 pontos (1 m/s, 2 m/s,..., 30 m/s) no entanto, visto que as velocidades de vento obtidas para cada patamar muito dificilmente corresponderão a essas abcissas definidas na curva, foi necessário recorrer ao cálculo para determinar a potência associada a cada um dos estados de vento. O processo consiste em linearizar o intervalo definido por dois pontos sucessivos da curva ao qual pertence o valor de velocidade de vento que caracteriza cada um dos patamares de vento.

Cada patamar de vento definido está associado a um valor de potência produzida, segundo a curva de potência característica da máquina. Cada estado possível do sistema é caracterizado por um determinado valor de potência que depende da potência das máquinas disponíveis e que é possível de extrair do recurso eólico. Assim, a energia produzida pelo aerogerador também será dependente do número de estados de vento considerados no estudo do sistema.

O número de estados de ventos possíveis determina não só os diversos estados que modelizam o comportamento do recurso eólico, e nos quais o sistema pode residir, mas também terá influência no valor de produção das máquinas.

Nas figuras IV-16 é possível observar e comparar os valores obtidos para caracterizar cada um dos estados de vento e a curva de potência características das máquinas oferecida pelo fabricante. Verifica-se que quanto maior for número de estados considerados para modelizar o recurso eólico, maior será a garantia de simular fielmente os cenários reais.

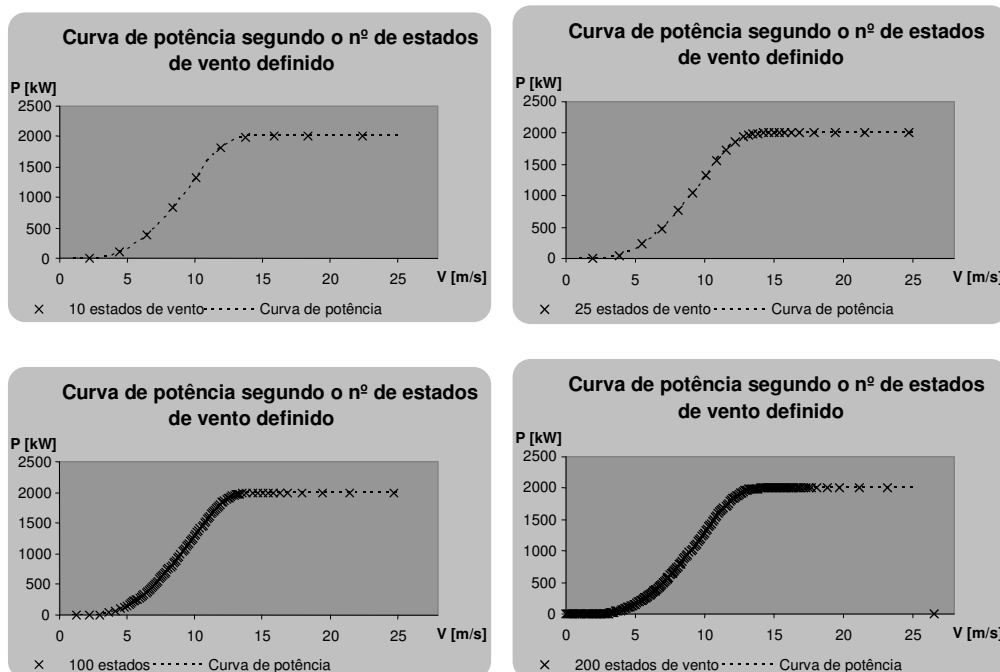


Figura IV-16: Curvas de potência obtidas para 10, 25, 100 e 200 estados de vento.

O tempo de cálculo é directamente dependente do número de estados de vento pretendidos. Para obter resultados fiáveis, evitando um cálculo extremamente pesado e demorado, deve ser encontrado o número de estados de vento que modeliza o comportamento do recurso eólico disponível com uma determinada precisão. Por observação das figuras IV-17 e IV-18, conclui-se que o recurso eólico é fielmente representado para a curva de vento em estudo a partir de 50 estados de vento.

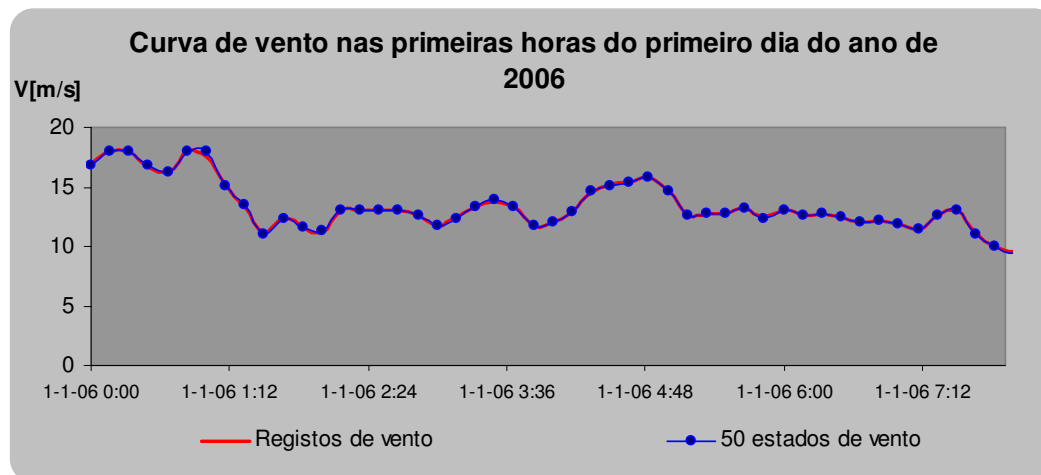


Figura IV-17: Curva de vento das 00h00 às 8h00 do dia 1 de Janeiro de 2006 registada no parque eólico em estudo.

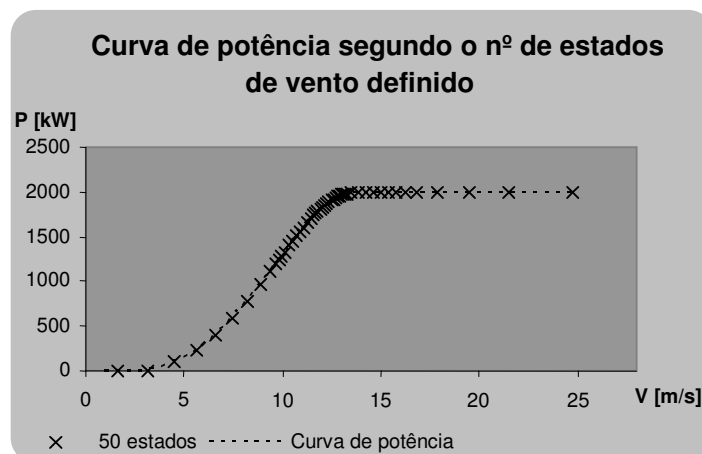


Figura IV-18: Curva de potência considerando 50 estados de vento.

4.6.3. Os resultados

Para a curva de vento de 2006, na tabela número IV-1, resumem-se os resultados obtidos para os índices de fiabilidade, definidos no Capítulo III, com o programa de cálculo. Para o ano de 2006, foram testados 9 casos diferentes com 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 e 200 estados de vento possíveis, correspondentes a diagramas de Markov com, respectivamente, 40, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 e 800 estados possíveis. Nos anexos de 1 a 9 encontram-se os resultados obtidos para as probabilidades de residência e a potência produzida em cada estado.

Em todos estes casos o sistema considerado é constituído por dois aerogeradores REpower MM82. A potência instalada (*Installed Wind Power IWP*) é de 4000 kW e assim, a energia instalada (*Installed Wind Energy IWE*) terá o valor de 35.040 MW.

$$IWE = IWP \cdot 8760 [MWh] = 2 \times 2 \times 8760 = 35040 MWh$$

2006	1	2	3	4	5	6	7	8	9
nº de estados de vento	10	25	50	75	100	125	150	175	200
IWP [kW]	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
IWE [MWh]	35.040	35.040	35.040	35.040	35.040	35.040	35.040	35.040	35.040
EAW [MWh]	13.770	13.753	13.777	13.769	13.785	13.789	13.789	13.789	13.774
EGWE [MWh]	12.972	12.956	12.979	12.971	12.986	12.990	12.989	12.990	12.976
WGAF	0,3702	0,3697	0,3704	0,3702	0,3706	0,3707	0,3707	0,3707	0,3703
FC	0,3930	0,3925	0,3932	0,3930	0,3934	0,3935	0,3935	0,3935	0,3931

Tabela IV-1: Resultados obtidos para o estudo de fiabilidade durante do ano de 2006.

O valor da energia disponível no recurso eólico (*Expected Available Wind Energy EAWE*) é calculado partindo do pressuposto que os aerogeradores estão sempre operacionais. O índice EAWE será o valor máximo de energia que o parque eólico em estudo poderá produzir.

O EAWE depende do número de estados de vento, e dos valores por estes assumidos, definidos para o estudo do sistema. De facto, verifica-se que este valor não é constante em todos os casos testados apesar de como dado de entrada ter sido usada a mesma curva de vento, isto é, os mesmo registos efectuados no ano de 2006. O mínimo valor deste índice é obtido quando são considerados 25 estados de vento e máximo quando considerados 125, 150 ou 175 estados de vento.

Ao considerar as saídas forçadas que as máquinas podem ter determina-se o valor previsto de produção do parque (*Expected Generated Wind Energy EGWE*). A variação dos resultados obtidos para o índice EGWE segue as mesmas variações que o índice EAWE. De facto, ambos são directamente dependentes da curva de vento e da forma como esta é modelizada.

O factor de disponibilidade do parque eólico (*Wind Generation Availability Factor WGAF*) fornece informação sobre a produtibilidade do parque em relação à energia máxima possível de extrair do recurso eólico e tem como valor limite o factor de capacidade (*Capacity Factor FC*). Sendo estes definidos pelo quociente entre EGWE e IWE e EAWE e IWE, respectivamente, seguirão de igual forma as variações sofridas pelos índices referidos no parágrafo anterior.

Para além dos índices de fiabilidade, são também calculadas as probabilidades de residência em cada estado possível do sistema. Com base nestas foi definida a tabela IV-2 com os valores das probabilidades do sistema no caso de:

1. não estar a produzir, independentemente da causa, ou seja, quer por falta de recurso disponível quer por avaria dos aerogeradores;
2. não produzir por falta ou excesso de recurso eólico;
3. pelo menos um dos aerogeradores se encontrar fora de serviço.

2006	1	2	3	4	5	6	7	8	9
nº de estados de vento	10	25	50	75	100	125	150	175	200
Probabilidade de não produzir	14,90%	11,90%	8,66%	16,39%	9,96%	12,66%	12,66%	12,66%	12,71%
Probabilidade de não produzir por falta de recurso eólico	14,64%	11,63%	8,39%	16,13%	9,69%	12,40%	12,40%	12,40%	12,44%
Probabilidade de pelo menos um dos aerogeradores se encontrar fora de serviço	9,64%	9,98%	10,34%	9,47%	10,20%	9,89%	9,89%	9,89%	9,89%

Tabela IV-2: Resultados obtidos para o estudo durante do ano de 2006.

O valor máximo da probabilidade de não haver produção é atingido quando definidos 75 estados de vento, enquanto que o mínimo é atingido com 50 estados de vento.

Verifica-se que o valor da probabilidade de não haver possibilidade de extrair energia do vento é próximo da probabilidade de não haver qualquer produção no parque. Este valor sugere que os índices de fiabilidade das máquinas são elevados, sendo a taxa de avaria diminuta, e que havendo mais do que um aerogerador a probabilidade de todos estarem fora de serviço é muito baixa. Assim, a probabilidade de não produzir é próxima da probabilidade da velocidade de vento se encontrar com valores fora da curva de potência características dos aerogeradores.

Tomou-se o mesmo procedimento para calcular os índices de fiabilidade com base na curva de vento obtida no ano de 2005. Foram testados 4 novos casos, com 100, 200, 400 e 800 estados possíveis de ocorrer no sistema em estudo. Nos anexos de 10 a 13 encontram-se os resultados obtidos para as probabilidades de residência e a potência produzida em cada estado.

O valor de IWP e IWE são idênticos aos da tabela IV-1 visto tratar-se igualmente, do estudo ao longo de um ano de dois aerogeradores (REpower M82) com 2000 kW de potência nominal.

Os restantes índices calculados verificam as relações descritas anteriormente com os valores máximos no caso em que são considerados apenas 50 estados de vento, correspondente a 200 estados possíveis em que o sistema pode residir.

2005	10	11	12	13
nº de estados de vento	25	50	100	200
IWP [kW]	4.000	4.000	4.000	4.000
IWE [MWh]	35.040	35.040	35.040	35.040
EAW [MWh]	14.190	14.194	14.175	14.176
EGWE [MWh]	13.368	13.371	13.353	13.354
WGAF	0,3815	0,3816	0,3811	0,3811
FC	0,4050	0,4051	0,4045	0,4046

Tabela IV-3: Resultados obtidos para o estudo durante do ano de 2005.

De igual modo podemos avaliar os valores das probabilidades de o parque eólico não se encontrar num estado de produção, de não produzir por indisponibilidade do recurso eólico ou de pelo menos um dos aerogeradores sofrer de avaria.

2005	10	11	12	13
nº de estados de vento	25	50	100	200
Probabilidade de não produzir	13,35%	10,69%	10,69%	11,30%
Probabilidade de não produzir por falta de recurso eólico	13,09%	10,42%	10,42%	11,04%
Probabilidade de pelo menos um dos geradores se encontrar fora de serviço	9,81%	10,11%	10,11%	10,04%

Tabela IV-4: Resultados obtidos para o estudo durante do ano de 2005.

O factor de capacidade do parque eólico, em ambos os anos, é cerca de 40% enquanto que o factor de disponibilidade assumiu os valores de 37% e 38% em 2006 e 2005, respectivamente. Tal significa que o factor de disponibilidade atinge o valor de 92,5% do seu limite, o factor de capacidade.

As saídas forçadas dos aerogeradores representam cerca de 10% das ocorrências estimadas em cada ano. Neste valor está incluída a probabilidade de todos os aerogeradores estarem fora de serviço, não havendo produção, e de estar apenas um deles fora de serviço, neste caso pode haver produção ou não, consoante haja ou não vento.

A probabilidade de o parque não produzir, estados em que todos os aerogeradores se encontram fora de serviço e estados em a velocidade de vento não permite a operacionalidade das máquinas, adquire valores próximos da probabilidade de não produção por falta de recurso eólico, estados em que a velocidade de vento não pertence ao intervalo de velocidades de accionamento das turbinas eólicas. Tal significa que, a maioria dos casos em que o parque eólico não se encontra em situação de poder injectar energia eléctrica na rede corresponde a situações em que a

velocidade de vento é inferior ou superior à velocidade de accionamento da turbina do aerogerador.

Os valores de produção de energia previstos obtidos pelo programa implementado são superiores aos valores que se registaram na realidade (por motivos de confidencialidade estes não podem ser apresentados). Esta discrepância entre os valores obtidos e os reais é justificada pelas aproximações efectuadas, quer nos dados utilizados de entrada, quer na modelização do sistema composto pelo parque eólico e pelo recurso eólico.

O resultados obtidos são influenciados pelas características dos aerogeradores consideradas, taxa de avaria, taxa de reparação e curva de potência, pelo número de estados de vento definidos e pela curva de vento.

A curva de vento é obtida através de medições efectuados em intervalos de 10 em 10 minutos na cabina dos aerogeradores. Com base nestas medições são registados os valores máximo, mínimo e médio verificados. Neste trabalho são considerados os valores médios registados. A segunda aproximação efectuada aos valores reais depende do número de estados de vento definidos. Assim, a correcta modelização do recurso eólico passa por uma recolha de dados eficiente seguida da definição do número conveniente de estados de vento a considerar no cálculo.

As características dos aerogeradores, nomeadamente a taxa de avaria, influenciam o valor da disponibilidade de produção.

As figuras IV-19 e IV-20 resumem os índices calculados para os casos de estudo testados.

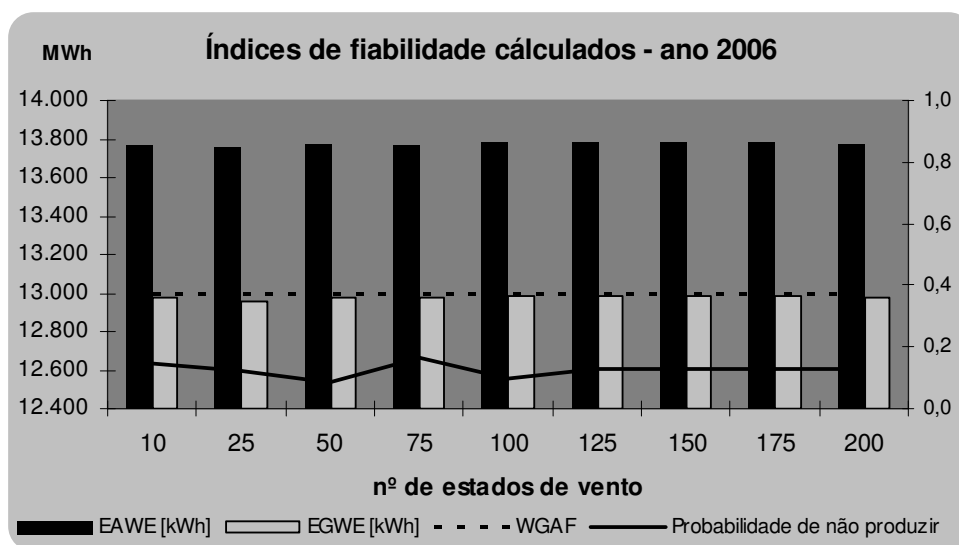


Figura IV-19: Índices de fiabilidade obtidos para o estudo do ano de 2006.

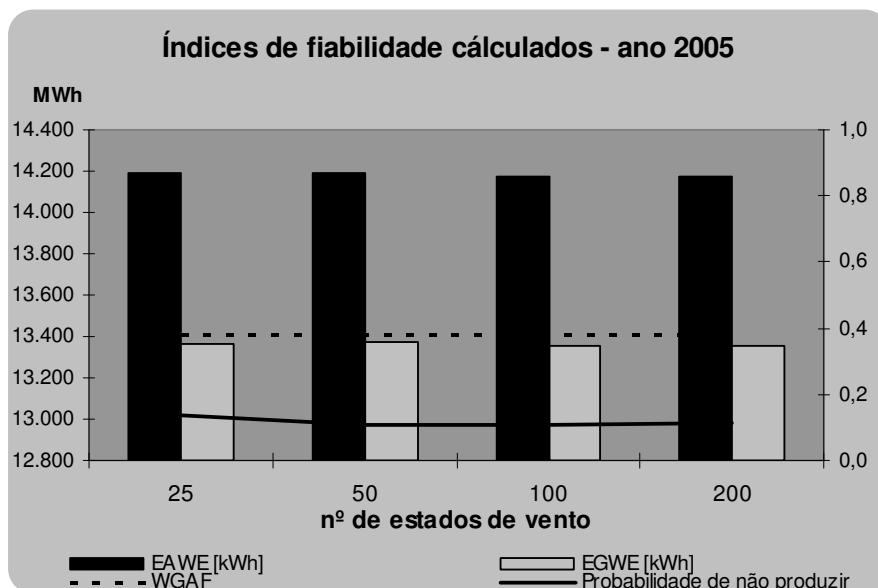


Figura IV-20: Índices de fiabilidade obtidos para o estudo do ano de 2005.

4.7. Resumo

O modelo de fiabilidade desenvolvido tem como base a modelização dos aerogeradores, em que a transição entre estados possíveis pode ocorrer por avaria ou reparação de um aerogerador, e a modelização do recurso disponível, o vento.

Com o programa implementado foram calculados os índices de fiabilidade estimados para o ano de 2005 e 2006 para um parque eólico situado no Norte do país. Os resultados reflectem as probabilidades e estimativas de geração do parque eólico e a utilidade do modelo implementado para a avaliação da fiabilidade do parque eólico. Essa avaliação é feita com base nos índices de fiabilidade calculados assim como no cálculo das probabilidades do parque eólico se encontrar em estado de produção.

Capítulo V. Conclusões

5.1. Objectivos atingidos

No estudo e planeamento dos sistemas eléctricos de energia, é de extrema importância a avaliação das incertezas associadas a cada um dos componentes que o constituem, assim como das incertezas associadas à fonte de energia em causa.

A injeção de energia nos sistemas, proveniente de parques eólicos, está associada aos níveis de intermitência característicos da fonte renovável, o vento. O vento, tal como outras fontes de energia de origem renovável, apresenta variações diárias e sazonais de difícil previsão. Nos últimos anos, a previsão e predição de vento tem sido objecto de estudo [23]. O desenvolvimento desses métodos tem como objectivo prever com maior exactidão a disponibilidade e produção dos parques eólicos.

O conhecimento de todas as características estatísticas do vento num determinado local auxilia a avaliação do desempenho do parque eólico em estudo. A correcta modelização do recurso eólico, e assim a avaliação da sua incerteza, tem de passar por uma análise cuidada dos registos obtidos com base nas medições efectuadas em determinados locais dos parques eólicos. A própria recolha de dados deve ser alvo de estudo e método de armazenamento de dados.

O modelo desenvolvido e apresentado neste trabalho tem como finalidade a modelização dos componentes físicos dos parques eólicos, aliado à modelização do próprio recurso disponível, que influencia a produção e desempenho do sistema

A modelização do recurso eólico aqui apresentada passa pelo tratamento estatístico dos registos obtidos, probabilidade de ocorrência, frequência e duração das diferentes velocidades de vento sentidas, de forma a representar as suas variações por um processo estocástico, através de um diagrama de Markov. No caso do estudo apresentado, um parque eólico no Norte do País, foram usadas duas curvas de registos efectuados ao longo de dois anos distintos, o ano de 2005 e o ano de 2006, tendo sido verificada a diferença de estimativa de produção de um ano para o outro. Conhecer o comportamento do vento ao longo de apenas um ano não é, de todo, suficiente para avaliar o recurso eólico disponível num determinado lugar nem a energia estimada possível de extrair. É necessário que a modelização por um processo estocástico seja feita com base em períodos de monitorização do vento superiores a um ano.

A principal simplificação efectuada no algoritmo corresponde à definição do número de estados de vento que consideramos ao construir o diagrama de Markov. Este número é obtido criando patamares de vento nos quais são agrupados os registos de velocidade de vento. A razão desta simplificação deve-se à necessidade de aligeirar o cálculo e diminuir o tempo de processamento do programa implementado.

Tal como se pode avaliar no Capítulo IV, o número de estados de vento a considerar influência drasticamente os índices de fiabilidade obtidos. Deste modo, a determinação do número de estados de vento necessários deve ser definido tendo em conta a qualidade dos dados de entrada e a precisão pretendida nos resultados finais. Ou seja, para que as estimativas de produção e disponibilidade calculadas sejam fiáveis e possibilitem uma análise e avaliação dos cenários possíveis de ocorrer na realidade é muito importante que a curva de vento tenha sido correctamente recolhida e que posteriormente ao tratamento dos dados seja correctamente modelizada.

Da análise dos índices de fiabilidade calculados e das probabilidades de residência em cada um dos estados possíveis verificou-se que, para o caso de estudo apresentado, a probabilidade de o parque eólico não produzir energia é próxima da probabilidade de a velocidade de vento sentida apresentar valores que não pertencem ao intervalo de accionamento da turbina eólica. Tal significa que a disponibilidade do parque eólico em estudo é dependente sobretudo do recurso eólico disponível e não dos aerogeradores que apresentam uma disponibilidade superior a 90%.

Quanto maior for o número de aerogeradores num parque eólico menor será a probabilidade de todos eles se encontrarem fora de serviço e, assim, a probabilidade de não haver produção por falta ou excesso de recurso eólico tende para o valor da probabilidade de o parque eólico não produzir. Ou seja, quanto maior for o número de aerogeradores, maior será a probabilidade de produção. Deste modo, maior será o valor da energia produzida estimada, aumentando os índices de desempenho do parque, nomeadamente, o factor de disponibilidade do parque *WGAF (Wind Generation Availability Factor)* que, nessa situação, tenderá para o seu valor limite, o factor de capacidade *FC (Capacity Factor)*.

O modelo desenvolvido é capaz de avaliar e estimar os índices de fiabilidade e produtibilidade de um parque eólico, combinando as características dos aerogeradores com a intermitência associada ao recurso renovável explorado. Para tal é necessário definir as taxas de avaria e reparação dos aerogeradores e modelizar o vento existente.

Actualmente, a evolução tecnológica proporciona o uso de aerogeradores com elevados índices de disponibilidade e controlo. Os requisitos exigidos por parte dos Operadores do Sistema são alcançáveis pelo que a diminuição da dificuldade de exploração e integração, actualmente sentidas, dos parques eólicos nos sistemas eléctricos, passa pela predição e previsão do recurso eólico disponível.

Na exploração dos sistemas eléctricos a avaliação das intermitências associadas à produção distribuída implica e obriga à criação de novos métodos e modelos de estudo e análise. Como se mostrou, a produção renovável deve ser modelizada não só tendo em consideração os componentes físicos mas também as características da fonte de energia explorada.

5.2. Perspectivas de trabalho futuro

Para trabalho futuro sugere-se o desenvolvimento de novos modelos que combinem todos os factores reais em jogo, isto é, modelos que incluam todos os parâmetros existentes no sistema real. Esses modelos devem ser robustos e com níveis de precisão adequados aos sistemas que se pretendem estudar e à sua finalidade.

O peso computacional associado à resolução deste tipo de problemas complexos pode tornar-se um entrave à obtenção de resultados satisfatórios em tempo útil. Assim, é importante a optimização do código do programa por forma a aumentar significativamente a sua utilidade e desempenho.

Para diminuir os impactos sentidos na rede resultantes da integração da produção eólica, é essencial encontrar novas formas de exploração e novos regulamentos que se adequem às necessidades actuais e futuras. Os modelos actualmente existentes, para as centrais de produção designadas de convencionais, não são adequados.

6. Referências *on line*

- [l.1] <http://www.dena.de>
- [l.2] <http://www.ieawind.org>
- [l.3] <http://www.windpower.org>
- [l.4] <http://www.gwec.net/>
- [l.5] <http://www.ewea.org/>
- [l.6] <http://www.bwea.com/>
- [l.7] <http://www.awea.com/>
- [l.8] <http://www.gamesa.es/>
- [l.9] <http://www.clipperwind.com/>
- [l.10] <http://www.suzlon.com/>
- [l.11] <http://www.horizonwind.com/home/>
- [l.12] <http://www.jwpa.jp/>
- [l.13] <http://www.repower.de/>
- [l.14] <http://www.windatlas.dk/>
- [l.15] <http://www.ren.pt>
- [l.16] <http://www.erse.pt>
- [l.17] <http://www.dgge.pt>
- [l.18] <http://www.apren.pt>
- [l.19] <http://www.energiasrenovaveis.com>

7. Referências e Bibliografia

- [1] Slootweg, Johannes Gerlof, *Modelling and Impact on Power System Dynamics, Wind Power* , Dezembro, 2003.
- [2] Milborrow, David, *Going Mainstream at the Grid Face, Windpower Monthly* pg.47, Setembro 2005.
- [3] *Global Wind Report 2005*, GWEC.
- [4] *The Costs and Impacts of Intermittency*, UKERC, 2006.
- [5] Info, OE, 1º trimestre de 2007.
- [6] Estanqueiro, Ana, *Aproveitamento do Potencial Eólico Sustentável em Portugal*, INETI, 2005.
- [7] Eriksen, Peter; Ackermann, Thomas; Abildgaard, Hans; Smmith, Paul; Winter, Whihelm; García, Juan, *System Operation with High Wind Penetration*, IEEE power & energy magazine pg. 65, Novembro/Dezembro 2005.
- [8] *A Energia Eólica em Portugal*, REN, Julho de 2007.
- [9] Sayas, F. Castro; Allan, R. N., *Generation availability assessment of wind faros*, IEE Proc. – Gener. Transm. Distrib., Vol. 143, Nº 5, Setembro de 1996.
- [10] *Global Wind Report 2006*, GWEC.
- [11] DIRECTIVA 2001/77/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, de 27 de Setembro de 2001.
- [12] Puntar, Sérgio Gonçalves, *Métodos e Visualização de Grupamentos de Dados*, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Julho de 2003 .
- [13] Castro, Rui M. G., *Introdução à Energia Eólica*, IST, Março de 2007.
- [14] Rosas, Pedro; Estanqueiro, Ana, *Guia de Projecto Eléctrico de Centrais Eólica*, WWEA, 2003.
- [15] Billinton, Roy and Wangdee, Wijarn, *Reliability – Based Transmission Reinforcement Planning Associated With Large – Scale Wind Farms*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, Nº 1, Fevereiro de 2007.

- [16] Gomes, P.; Schilling, M. Th.; Lima, J. W. Marangon; Martins, N., *Considerações sobre a utilização crescente da geração distribuída no atendimento ao crescimento de mercado*, ONS – Brasil.
- [17] REpower Sytems, *MM82 Technical Description Data*, Março de 2005.
- [18] Heier, Siegfried, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Chicester,UK: JohnWiley & Sons Ltd., 1998.
- [19] CIGRE TF38.01.10, *Modeling New Forms of Generation and Storage*, Novembro de 2000.
- [20] Olz, Samantha; Sims, Ralph and Kirchner, Nicolai, *Contribution of Renewables to Energy Security*, IEA, Abril de 2007.
- [21] Leite, Andréa; Borges, Carmen and Falcão, Djma, *Probabilistic Wind Farms Generation Model for Reliability Studies Applied to Brazilian Sites*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, Nº 4, Novembro de 2006.
- [22] Paiva, José Sucena, *Electricidade para todos – A segurança no abastecimento*, IST, Novembro de 2005.
- [23] Sideratos, George and Hatziargyriou, Nikos, *An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, Nº 1, Fevereiro de 2007.
- [24] Flueger, Antonio, *Variability of Wind Power and Others Renewables – Management options and strategies*, IEA, Junho de 2005.
- [25] *Large Scale Integration of Wind Energy in the European Power Supply: analysis, issues and recommendations*, EWEA, Dezembro de 2005.
- [26] Karki, Rajesh; Hu, Po and Billinton, Roy, *A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, Nº 2, Junho de 2006.
- [27] Annunzio, C. and Santoso, S., *Wind Power Generation Reliability Analysis and Modeling*, IEEE, 2005.
- [28] Doherty, Ronan and Malley, Mark, *A New Approach to Quantify Reserve Demand in Systems With Significant Installed Wind Capacity*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, Nº 2, Maio de 2005.
- [29] Barbosa, F. Maciel, *Fiabilidade do Sistema de Produção/Transporte*, FEUP, 2005.

- [30] Barbosa, F. Maciel, *Introdução à Fiabilidade de Sistemas Eléctricos de Energia*, FEUP, Abril de 1983.
- [31] Rodrigues, Álvaro, *Apontamentos de Energia Eólica – Mestrado em Energias Renováveis*, FEUP, 2005.
- [32] Lopes, J. A. Peças, *Apontamentos de Energia Eólica – Mestrado em Energias Renováveis*, FEUP, 2005.
- [33] *Regras para a apresentação de dissertações de cursos de mestrado da FEUP*, FEUP, Julho de 1995.
- [34] *Dados técnicos – Caracterização do ano 2007*, REN, Janeiro de 2008.

Anexo 1. Caso 1 – Resultados computacionais

Caso 1	10 estados de vento → 40 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0570	3984
2	0,0024	1992
3	0,0047	1992
4	0,0002	0
5	0,0040	4000
6	0,0002	2000
7	0,0003	2000
8	0,0000	0
9	0,0159	4000
10	0,0007	2000
11	0,0013	2000
12	0,0001	0
13	0,0720	3621
14	0,0030	1810
15	0,0059	1810
16	0,0002	0
17	0,1138	2642
18	0,0047	1321
19	0,0094	1321
20	0,0004	0
21	0,0373	4000
22	0,0015	2000
23	0,0031	2000
24	0,0001	0
25	0,1322	1648
26	0,0055	824
27	0,0109	824
28	0,0005	0
29	0,1675	764
30	0,0069	382
31	0,0138	382
32	0,0006	0
33	0,1298	0
34	0,0054	0
35	0,0107	0
36	0,0004	0
37	0,1576	199
38	0,0065	100
39	0,0130	100
40	0,0005	0

Anexo 2. Caso 2 – Resultados computacionais

Caso 2	25 estados de vento → 100 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0088	4000
2	0,0004	2000
3	0,0007	2000
4	0,0000	0
5	0,0011	4000
6	0,0000	2000
7	0,0001	2000
8	0,0000	0
9	0,0028	4000
10	0,0001	2000
11	0,0002	2000
12	0,0000	0
13	0,0093	4000
14	0,0004	2000
15	0,0008	2000
16	0,0000	0
17	0,0075	4000
18	0,0003	2000
19	0,0006	2000
20	0,0000	0
21	0,0054	4000
22	0,0002	2000
23	0,0004	2000
24	0,0000	0
25	0,0081	4000
26	0,0003	2000
27	0,0007	2000
28	0,0000	0
29	0,0123	3972
30	0,0005	1986
31	0,0010	1986
32	0,0000	0
33	0,1032	0
34	0,0043	0
35	0,0085	0
36	0,0004	0
37	0,0625	2645
38	0,0026	1323
39	0,0052	1323
40	0,0002	0
41	0,1206	449
42	0,0050	225
43	0,0100	225
44	0,0004	0
45	0,1301	103
46	0,0054	51
47	0,0107	51
48	0,0004	0
49	0,0222	3738
50	0,0009	1869

Caso 2	25 estados de vento → 100 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
51	0,0018	1869
52	0,0001	0
53	0,0146	3875
54	0,0006	1938
55	0,0012	1938
56	0,0000	0
57	0,0341	3125
58	0,0014	1563
59	0,0028	1563
60	0,0001	0
61	0,0818	1517
62	0,0034	759
63	0,0067	759
64	0,0003	0
65	0,0134	3952
66	0,0006	1976
67	0,0011	1976
68	0,0000	0
69	0,0103	3991
70	0,0004	1996
71	0,0008	1996
72	0,0000	0
73	0,1090	939
74	0,0045	470
75	0,0090	470
76	0,0004	0
77	0,0693	2091
78	0,0029	1046
79	0,0057	1046
80	0,0002	0
81	0,0294	3467
82	0,0012	1733
83	0,0024	1733
84	0,0001	0
85	0,0093	4000
86	0,0004	2000
87	0,0008	2000
88	0,0000	0
89	0,0052	4000
90	0,0002	2000
91	0,0004	2000
92	0,0000	0
93	0,0088	4000
94	0,0004	2000
95	0,0007	2000
96	0,0000	0
97	0,0080	4000
98	0,0003	2000
99	0,0007	2000
100	0,0000	0

Anexo 3. Caso 3 – Resultados computacionais

Caso 3 50 estados de vento → 200 estados possíveis			Caso 3 50 estados de vento → 200 estados possíveis		
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]	Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0088	4000	100	0,0000	0
2	0,0004	2000	101	0,0036	3861
3	0,0007	2000	102	0,0001	1931
4	0,0000	0	103	0,0003	1931
5	0,0011	4000	104	0,0000	0
6	0,0000	2000	105	0,0038	3889
7	0,0001	2000	106	0,0002	1944
8	0,0000	0	107	0,0003	1944
9	0,0028	4000	108	0,0000	0
10	0,0001	2000	109	0,0035	3955
11	0,0002	2000	110	0,0001	1978
12	0,0000	0	111	0,0003	1978
13	0,0093	4000	112	0,0000	0
14	0,0004	2000	113	0,0039	3806
15	0,0008	2000	114	0,0002	1903
16	0,0000	0	115	0,0003	1903
17	0,0075	4000	116	0,0000	0
18	0,0003	2000	117	0,0037	3668
19	0,0006	2000	118	0,0002	1834
20	0,0000	0	119	0,0003	1834
21	0,0054	4000	120	0,0000	0
22	0,0002	2000	121	0,0037	3723
23	0,0004	2000	122	0,0002	1862
24	0,0000	0	123	0,0003	1862
25	0,0081	4000	...	...	...
26	0,0003	2000	176	0,0003	0
27	0,0007	2000	177	0,0517	1574
28	0,0000	0	178	0,0021	787
29	0,0122	3972	179	0,0043	787
30	0,0005	1986	180	0,0002	0
31	0,0010	1986	181	0,0722	813
...	...	...	182	0,0030	407
51	0,0003	1972	183	0,0060	407
52	0,0000	0	184	0,0002	0
53	0,0034	3950	185	0,0673	1187
54	0,0001	1975	186	0,0028	593
55	0,0003	1975	187	0,0056	593
56	0,0000	0	188	0,0002	0
57	0,0035	3834	189	0,0892	476
58	0,0001	1917	190	0,0037	238
59	0,0003	1917	191	0,0074	238
60	0,0000	0	192	0,0003	0
61	0,0039	3572	193	0,0883	20
62	0,0002	1786	194	0,0036	10
63	0,0003	1786	195	0,0073	10
64	0,0000	0	196	0,0003	0
65	0,0033	3961	197	0,0744	0
66	0,0001	1980	198	0,0031	0
...	...	...	199	0,0061	0
99	0,0007	2000	200	0,0003	0

Anexo 4. Caso 4 – Resultados computacionais

Caso 4	75 estados de vento → 300 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0088	4000
2	0,0004	2000
3	0,0007	2000
4	0,0000	0
5	0,0011	4000
6	0,0000	2000
7	0,0001	2000
8	0,0000	0
9	0,0028	4000
10	0,0001	2000
11	0,0002	2000
12	0,0000	0
13	0,0093	4000
14	0,0004	2000
15	0,0008	2000
16	0,0000	0
17	0,0075	4000
18	0,0003	2000
19	0,0006	2000
20	0,0000	0
21	0,0054	4000
22	0,0002	2000
23	0,0004	2000
24	0,0000	0
25	0,0081	4000
26	0,0003	2000
27	0,0007	2000
28	0,0000	0
29	0,0122	3972
30	0,0005	1986
31	0,0010	1986
...
100	0,0000	0
101	0,0036	3861
102	0,0001	1931
103	0,0003	1931
104	0,0000	0
105	0,0038	3889
106	0,0002	1944
107	0,0003	1944
108	0,0000	0
109	0,0035	3955
110	0,0001	1978
111	0,0003	1978
112	0,0000	0
113	0,0039	3806
114	0,0002	1903
115	0,0003	1903
...
199	0,0051	151

Caso 4	75 estados de vento → 300 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
200	0,0002	0
201	0,0754	130
202	0,0031	65
203	0,0062	65
204	0,0003	0
205	0,0229	935
206	0,0009	468
207	0,0019	468
208	0,0001	0
209	0,0152	1242
210	0,0006	621
211	0,0013	621
212	0,0001	0
213	0,0148	1983
214	0,0006	991
215	0,0012	991
216	0,0001	0
217	0,0345	638
218	0,0014	319
219	0,0028	319
220	0,0001	0
221	0,0063	2760
222	0,0003	1380
223	0,0005	1380
...
276	0,0000	0
277	0,0048	3332
278	0,0002	1666
279	0,0004	1666
280	0,0000	0
281	0,0047	2943
282	0,0002	1472
283	0,0004	1472
284	0,0000	0
285	0,0048	3188
286	0,0002	1594
287	0,0004	1594
288	0,0000	0
289	0,0048	3127
290	0,0002	1563
291	0,0004	1563
292	0,0000	0
293	0,0045	3380
294	0,0002	1690
295	0,0004	1690
296	0,0000	0
297	0,0073	2406
298	0,0003	1203
299	0,0006	1203
300	0,0000	0

Anexo 5. Caso 5 – Resultados computacionais

Caso 5			100 estados de vento → 400 estados possíveis		
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]	Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0088	4000	200	0,0001	0
2	0,0004	2000	201	0,0082	526
3	0,0007	2000	202	0,0003	263
4	0,0000	0	203	0,0007	263
5	0,0011	4000	204	0,0000	0
6	0,0000	2000	205	0,0079	974
7	0,0001	2000	206	0,0003	487
8	0,0000	0	207	0,0007	487
9	0,0028	4000	208	0,0000	0
10	0,0001	2000	209	0,0074	1267
11	0,0002	2000	210	0,0003	633
12	0,0000	0	211	0,0006	633
13	0,0093	4000	212	0,0000	0
14	0,0004	2000	213	0,0148	1983
15	0,0008	2000	214	0,0006	991
16	0,0000	0	215	0,0012	991
17	0,0075	4000	216	0,0001	0
18	0,0003	2000	217	0,0077	816
19	0,0006	2000	218	0,0003	408
20	0,0000	0	219	0,0006	408
21	0,0054	4000	220	0,0000	0
22	0,0002	2000	221	0,0063	2760
23	0,0004	2000	222	0,0003	1380
24	0,0000	0	223	0,0005	1380
25	0,0081	4000	...	...	...
26	0,0003	2000	376	0,0001	0
27	0,0007	2000	377	0,0220	213
28	0,0000	0	378	0,0009	107
29	0,0122	3972	379	0,0018	107
30	0,0005	1986	380	0,0001	0
31	0,0010	1986	381	0,0344	147
...	...	...	382	0,0014	74
81	0,0036	3916	383	0,0028	74
82	0,0001	1958	384	0,0001	0
83	0,0003	1958	385	0,0478	0
84	0,0000	0	386	0,0020	0
85	0,0093	4000	387	0,0039	0
86	0,0004	2000	388	0,0002	0
87	0,0008	2000	389	0,0440	2
88	0,0000	0	390	0,0018	1
89	0,0051	4000	391	0,0036	1
90	0,0002	2000	392	0,0002	0
91	0,0004	2000	393	0,0395	76
92	0,0000	0	394	0,0016	38
93	0,0088	4000	395	0,0033	38
94	0,0004	2000	396	0,0001	0
95	0,0007	2000	397	0,0381	0
96	0,0000	0	398	0,0016	0
...	...	...	399	0,0031	0
199	0,0014	340	400	0,0001	0

Anexo 6. Caso 6 – Resultados computacionais

Caso 6	125 estados de vento → 500 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0088	4000
2	0,0004	2000
3	0,0007	2000
4	0,0000	0
5	0,0011	4000
6	0,0000	2000
7	0,0001	2000
8	0,0000	0
9	0,0028	4000
10	0,0001	2000
11	0,0002	2000
12	0,0000	0
13	0,0093	4000
14	0,0004	2000
15	0,0008	2000
16	0,0000	0
17	0,0075	4000
18	0,0003	2000
19	0,0006	2000
20	0,0000	0
21	0,0054	4000
22	0,0002	2000
23	0,0004	2000
24	0,0000	0
25	0,0081	4000
26	0,0003	2000
27	0,0007	2000
28	0,0000	0
29	0,0122	3972
30	0,0005	1986
31	0,0010	1986
...
194	0,0006	560
195	0,0013	560
196	0,0001	0
197	0,0164	679
198	0,0007	340
199	0,0014	340
200	0,0001	0
201	0,0082	526
202	0,0003	263
203	0,0007	263
204	0,0000	0
205	0,0079	974
206	0,0003	487
207	0,0007	487
208	0,0000	0
209	0,0074	1267
...
374	0,0007	150

Caso 6	125 estados de vento → 500 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
375	0,0013	150
376	0,0001	0
377	0,0148	223
378	0,0006	111
379	0,0012	111
380	0,0001	0
381	0,0072	194
382	0,0003	97
383	0,0006	97
384	0,0000	0
385	0,0069	116
386	0,0003	58
387	0,0006	58
388	0,0000	0
389	0,0141	155
390	0,0006	77
391	0,0012	77
392	0,0000	0
393	0,0068	174
394	0,0003	87
395	0,0006	87
396	0,0000	0
397	0,0068	104
398	0,0003	52
...
476	0,0000	0
477	0,0044	0
478	0,0002	0
479	0,0004	0
480	0,0000	0
481	0,0039	0
482	0,0002	0
483	0,0003	0
484	0,0000	0
485	0,0047	0
486	0,0002	0
487	0,0004	0
488	0,0000	0
489	0,0056	0
490	0,0002	0
491	0,0005	0
492	0,0000	0
493	0,0059	0
494	0,0002	0
495	0,0005	0
496	0,0000	0
497	0,0068	23
498	0,0003	12
499	0,0006	12
500	0,0000	0

Anexo 7. Caso 7 – Resultados computacionais

Caso 7			150 estados de vento → 600 estados possíveis		
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]	Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0088	4000	494	0,0002	0
2	0,0004	2000	495	0,0005	0
3	0,0007	2000	496	0,0000	0
4	0,0000	0	497	0,0068	23
5	0,0011	4000	498	0,0003	12
6	0,0000	2000	499	0,0006	12
7	0,0001	2000	500	0,0000	0
8	0,0000	0	501	0,0063	0
9	0,0028	4000	502	0,0003	0
10	0,0001	2000	503	0,0005	0
11	0,0002	2000	504	0,0000	0
12	0,0000	0	505	0,0081	310
13	0,0093	4000	506	0,0003	155
14	0,0004	2000	507	0,0007	155
15	0,0008	2000	508	0,0000	0
16	0,0000	0	509	0,0073	232
17	0,0075	4000	510	0,0003	116
18	0,0003	2000	511	0,0006	116
19	0,0006	2000	512	0,0000	0
20	0,0000	0	513	0,0075	337
21	0,0054	4000	514	0,0003	169
22	0,0002	2000	515	0,0006	169
23	0,0004	2000	516	0,0000	0
24	0,0000	0	517	0,0075	252
25	0,0020	4000	...	...	...
26	0,0001	2000	576	0,0000	0
27	0,0002	2000	577	0,0056	0
28	0,0000	0	578	0,0002	0
29	0,0035	3966	579	0,0005	0
30	0,0001	1983	580	0,0000	0
31	0,0003	1983	581	0,0035	0
...	...	...	582	0,0001	0
227	0,0005	1118	583	0,0003	0
228	0,0000	0	584	0,0000	0
229	0,0062	2698	585	0,0029	0
230	0,0003	1349	586	0,0001	0
231	0,0005	1349	587	0,0002	0
232	0,0000	0	588	0,0000	0
233	0,0072	1169	589	0,0024	0
234	0,0003	585	590	0,0001	0
235	0,0006	585	591	0,0002	0
236	0,0000	0	592	0,0000	0
237	0,0070	1072	593	0,0029	0
238	0,0003	536	594	0,0001	0
239	0,0006	536	595	0,0002	0
240	0,0000	0	596	0,0000	0
241	0,0080	856	597	0,0079	659
242	0,0003	428	598	0,0003	329
...	...	...	599	0,0007	329
493	0,0059	0	600	0,0000	0

Anexo 8. Caso 8 – Resultados computacionais

Caso 8			Caso 8		
175 estados de vento → 700 estados possíveis			175 estados de vento → 700 estados possíveis		
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]	Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0061	4000	545	0,0023	4000
2	0,0003	2000	546	0,0001	2000
3	0,0005	2000	547	0,0002	2000
4	0,0000	0	548	0,0000	0
5	0,0011	4000	549	0,0026	4000
6	0,0000	2000	550	0,0001	2000
7	0,0001	2000	551	0,0002	2000
8	0,0000	0	552	0,0000	0
9	0,0025	4000	553	0,0021	4000
10	0,0001	2000	554	0,0001	2000
11	0,0002	2000	555	0,0002	2000
12	0,0000	0	556	0,0000	0
13	0,0066	4000	557	0,0020	4000
14	0,0003	2000	558	0,0001	2000
15	0,0005	2000	559	0,0002	2000
16	0,0000	0	560	0,0000	0
17	0,0081	4000	561	0,0021	4000
18	0,0003	2000	562	0,0001	2000
19	0,0007	2000	563	0,0002	2000
20	0,0000	0	564	0,0000	0
21	0,0044	4000	565	0,0020	4000
22	0,0002	2000	566	0,0001	2000
23	0,0004	2000	567	0,0002	2000
24	0,0000	0	568	0,0000	0
25	0,0020	4000	...	...	...
26	0,0001	2000	676	0,0000	0
27	0,0002	2000	677	0,0000	1291
28	0,0000	0	678	0,0000	646
29	0,0035	3966	679	0,0000	646
30	0,0001	1983	680	0,0000	0
31	0,0003	1983	681	0,0000	1438
...	...	...	682	0,0000	719
327	0,0006	467	683	0,0000	719
328	0,0000	0	684	0,0000	0
329	0,0075	895	685	0,0001	1602
330	0,0003	448	686	0,0000	801
331	0,0006	448	687	0,0000	801
332	0,0000	0	688	0,0000	0
333	0,0078	1218	689	0,0000	1355
334	0,0003	609	690	0,0000	677
335	0,0006	609	691	0,0000	677
336	0,0000	0	692	0,0000	0
337	0,0091	619	693	0,0000	1125
338	0,0004	310	694	0,0000	563
339	0,0007	310	695	0,0000	563
340	0,0000	0	696	0,0000	0
341	0,0086	738	697	0,0000	911
342	0,0004	369	698	0,0000	455
...	...	...	699	0,0000	455
544	0,0000	0	700	0,0000	0

Anexo 9. Caso 9 – Resultados computacionais

Caso 9			200 estados de vento → 800 estados possíveis		
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]	Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0018	4000	635	0,0000	0
2	0,0001	2000	636	0,0000	0
3	0,0002	2000	637	0,0006	0
4	0,0000	0	638	0,0000	0
5	0,0034	4000	639	0,0001	0
6	0,0001	2000	640	0,0000	0
7	0,0003	2000	641	0,0017	4000
8	0,0000	0	642	0,0001	2000
9	0,0030	4000	643	0,0001	2000
10	0,0001	2000	644	0,0000	0
11	0,0003	2000	645	0,0021	4000
12	0,0000	0	646	0,0001	2000
13	0,0028	4000	647	0,0002	2000
14	0,0001	2000	648	0,0000	0
15	0,0002	2000	649	0,0017	4000
16	0,0000	0	650	0,0001	2000
17	0,0016	4000	651	0,0001	2000
18	0,0001	2000	652	0,0000	0
19	0,0001	2000	653	0,0018	4000
20	0,0000	0	654	0,0001	2000
21	0,0023	4000	655	0,0002	2000
22	0,0001	2000	656	0,0000	0
23	0,0002	2000	657	0,0017	4000
24	0,0000	0	658	0,0001	2000
25	0,0020	4000	...	...	...
26	0,0001	2000	776	0,0000	0
27	0,0002	2000	777	0,0017	4000
28	0,0000	0	778	0,0001	2000
29	0,0035	3966	779	0,0001	2000
30	0,0001	1983	780	0,0000	0
31	0,0003	1983	781	0,0017	4000
...	...	...	782	0,0001	2000
373	0,0080	291	783	0,0001	2000
374	0,0003	145	784	0,0000	0
375	0,0007	145	785	0,0009	4000
376	0,0000	0	786	0,0000	2000
377	0,0075	213	787	0,0001	2000
378	0,0003	107	788	0,0000	0
379	0,0006	107	789	0,0021	4000
380	0,0000	0	790	0,0001	2000
381	0,0072	194	791	0,0002	2000
382	0,0003	97	792	0,0000	0
383	0,0006	97	793	0,0015	4000
384	0,0000	0	794	0,0001	2000
385	0,0069	116	795	0,0001	2000
386	0,0003	58	796	0,0000	0
387	0,0006	58	797	0,0004	0
388	0,0000	0	798	0,0000	0
...	...	...	799	0,0000	0
634	0,0000	0	800	0,0000	0

Anexo 10. Caso 10 – Resultados computacionais

Caso 10	25 estados de vento → 100 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0427	73
2	0,0018	37
3	0,0035	37
4	0,0001	0
5	0,0333	160
6	0,0014	80
7	0,0027	80
8	0,0001	0
9	0,0223	229
10	0,0009	114
11	0,0018	114
12	0,0001	0
13	0,0306	538
14	0,0013	269
15	0,0025	269
16	0,0001	0
17	0,0549	1173
18	0,0023	587
19	0,0045	587
20	0,0002	0
21	0,0661	1945
22	0,0027	973
23	0,0055	973
24	0,0002	0
25	0,0578	4000
26	0,0024	2000
27	0,0048	2000
28	0,0002	0
29	0,0707	3137
30	0,0029	1569
31	0,0058	1569
32	0,0002	0
33	0,0639	2469
34	0,0026	1235
35	0,0053	1235
36	0,0002	0
37	0,0314	4000
38	0,0013	2000
39	0,0026	2000
40	0,0001	0
41	0,0092	4000
42	0,0004	2000
43	0,0008	2000
44	0,0000	0
45	0,0679	3745
46	0,0028	1872
47	0,0056	1872
48	0,0002	0
49	0,0596	1511
50	0,0025	756

Caso 10	25 estados de vento → 100 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
51	0,0049	756
52	0,0002	0
53	0,0472	889
54	0,0020	444
55	0,0039	444
56	0,0002	0
57	0,0412	688
58	0,0017	344
59	0,0034	344
60	0,0001	0
61	0,0066	422
62	0,0003	211
63	0,0005	211
64	0,0000	0
65	0,0080	369
66	0,0003	185
67	0,0007	185
68	0,0000	0
69	0,0154	459
70	0,0006	230
71	0,0013	230
72	0,0001	0
73	0,0074	342
74	0,0003	171
75	0,0006	171
76	0,0000	0
77	0,0124	309
78	0,0005	155
79	0,0010	155
80	0,0000	0
81	0,0074	394
82	0,0003	197
83	0,0006	197
84	0,0000	0
85	0,0151	276
86	0,0006	138
87	0,0012	138
88	0,0001	0
89	0,0400	0
90	0,0017	0
91	0,0033	0
92	0,0001	0
93	0,0448	0
94	0,0019	0
95	0,0037	0
96	0,0002	0
97	0,0313	0
98	0,0013	0
99	0,0026	0
100	0,0001	0

Anexo 11. Caso 11 – Resultados computacionais

Caso 11	50 estados de vento → 200 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0078	173
2	0,0003	86
3	0,0006	86
4	0,0000	0
5	0,0147	220
6	0,0006	110
7	0,0012	110
8	0,0001	0
9	0,0075	247
10	0,0003	123
11	0,0006	123
12	0,0000	0
13	0,0306	538
14	0,0013	269
15	0,0025	269
16	0,0001	0
17	0,0549	1173
18	0,0023	587
19	0,0045	587
20	0,0002	0
21	0,0661	1945
22	0,0027	973
23	0,0055	973
24	0,0002	0
25	0,0578	4000
26	0,0024	2000
27	0,0048	2000
28	0,0002	0
29	0,0707	3137
30	0,0029	1569
31	0,0058	1569
...
34	0,0026	1235
35	0,0053	1235
36	0,0002	0
37	0,0314	4000
38	0,0013	2000
39	0,0026	2000
40	0,0001	0
41	0,0092	4000
42	0,0004	2000
43	0,0008	2000
44	0,0000	0
45	0,0679	3745
46	0,0028	1872
47	0,0056	1872
48	0,0002	0
49	0,0596	1511
...
99	0,0009	0

Caso 9	50 estados de vento → 200 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
100	0,0000	0
101	0,0062	49
102	0,0003	25
103	0,0005	25
104	0,0000	0
105	0,0086	30
106	0,0004	15
107	0,0007	15
108	0,0000	0
109	0,0051	0
110	0,0002	0
111	0,0004	0
112	0,0000	0
113	0,0064	72
114	0,0003	36
115	0,0005	36
116	0,0000	0
117	0,0072	191
118	0,0003	96
119	0,0006	96
120	0,0000	0
121	0,0042	41
122	0,0002	20
123	0,0003	20
...
176	0,0000	0
177	0,0012	0
178	0,0000	0
179	0,0001	0
180	0,0000	0
181	0,0035	0
182	0,0001	0
183	0,0003	0
184	0,0000	0
185	0,0012	0
186	0,0001	0
187	0,0001	0
188	0,0000	0
189	0,0020	0
190	0,0001	0
191	0,0002	0
192	0,0000	0
193	0,0016	0
194	0,0001	0
195	0,0001	0
196	0,0000	0
197	0,0058	0
198	0,0002	0
199	0,0005	0
200	0,0000	0

Anexo 12. Caso 12 – Resultados computacionais

Caso 12			100 estados de vento → 400 estados possíveis		
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]	Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0077	116	340	0,0000	0
2	0,0003	58	341	0,0046	1462
3	0,0006	58	342	0,0002	731
4	0,0000	0	343	0,0004	731
5	0,0076	310	344	0,0000	0
6	0,0003	155	345	0,0037	1462
7	0,0006	155	346	0,0002	731
8	0,0000	0	347	0,0003	731
9	0,0075	310	348	0,0000	0
10	0,0003	155	349	0,0000	1462
11	0,0006	155	350	0,0000	731
12	0,0000	0	351	0,0000	731
13	0,0077	580	352	0,0000	0
14	0,0003	290	353	0,0122	1462
15	0,0006	290	354	0,0005	731
16	0,0000	0	355	0,0010	731
17	0,0088	974	356	0,0000	0
18	0,0004	487	357	0,0153	1462
19	0,0007	487	358	0,0006	731
20	0,0000	0	359	0,0013	731
21	0,0084	974	360	0,0001	0
22	0,0003	487	361	0,0236	1462
23	0,0007	487	362	0,0010	731
24	0,0000	0	363	0,0019	731
25	0,0047	974	...	...	...
26	0,0002	487	376	0,0002	0
27	0,0004	487	377	0,0488	3188
28	0,0000	0	378	0,0020	1594
29	0,0093	974	379	0,0040	1594
30	0,0004	487	380	0,0002	0
31	0,0008	487	381	0,0482	3668
...	...	...	382	0,0020	1834
270	0,0003	290	383	0,0040	1834
271	0,0007	290	384	0,0002	0
272	0,0000	0	385	0,0448	4000
273	0,0166	580	386	0,0019	2000
274	0,0007	290	387	0,0037	2000
275	0,0014	290	388	0,0002	0
276	0,0001	0	389	0,0308	4000
277	0,0135	580	390	0,0013	2000
278	0,0006	290	391	0,0025	2000
279	0,0011	290	392	0,0001	0
280	0,0000	0	393	0,0164	4000
281	0,0084	974	394	0,0007	2000
282	0,0003	487	395	0,0014	2000
283	0,0007	487	396	0,0001	0
284	0,0000	0	397	0,0064	4000
285	0,0001	974	398	0,0003	2000
...	...	...	399	0,0005	2000
339	0,0003	731	400	0,0000	0

Anexo 13. Caso 13 – Resultados computacionais

Caso 13	200 estados de vento → 800 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
1	0,0077	173
2	0,0003	86
3	0,0006	86
4	0,0000	0
5	0,0076	229
6	0,0003	114
7	0,0006	114
8	0,0000	0
9	0,0075	247
10	0,0003	123
11	0,0006	123
12	0,0000	0
13	0,0077	524
14	0,0003	262
15	0,0006	262
16	0,0000	0
17	0,0087	827
18	0,0004	413
19	0,0007	413
20	0,0000	0
21	0,0084	940
22	0,0003	470
23	0,0007	470
24	0,0000	0
25	0,0047	1208
26	0,0002	604
27	0,0004	604
28	0,0000	0
29	0,0093	1072
30	0,0004	536
31	0,0008	536
...
281	0,0001	848
282	0,0000	424
283	0,0000	424
284	0,0000	0
285	0,0001	914
286	0,0000	457
287	0,0000	457
288	0,0000	0
289	0,0031	974
290	0,0001	487
291	0,0003	487
292	0,0000	0
293	0,0031	1023
294	0,0001	511
295	0,0003	511
296	0,0000	0
...
527	0,0004	719

Caso 13	200 estados de vento → 800 estados possíveis	
Estado Nº	Probab. de residência	Potência produzida [kW]
528	0,0000	0
529	0,0052	718
530	0,0002	359
531	0,0004	359
532	0,0000	0
533	0,0084	863
534	0,0003	432
535	0,0007	432
536	0,0000	0
537	0,0067	2277
538	0,0003	1139
539	0,0006	1139
540	0,0000	0
541	0,0064	2526
542	0,0003	1263
543	0,0005	1263
544	0,0000	0
545	0,0084	2596
546	0,0003	1298
547	0,0007	1298
548	0,0000	0
549	0,0055	2936
550	0,0002	1468
551	0,0005	1468
...
776	0,0000	0
777	0,0136	4000
778	0,0006	2000
779	0,0011	2000
780	0,0000	0
781	0,0138	3997
782	0,0006	1999
783	0,0011	1999
784	0,0000	0
785	0,0066	4000
786	0,0003	2000
787	0,0005	2000
788	0,0000	0
789	0,0147	4000
790	0,0006	2000
791	0,0012	2000
792	0,0001	0
793	0,0019	4000
794	0,0001	2000
795	0,0002	2000
796	0,0000	0
797	0,0108	4000
798	0,0004	2000
799	0,0009	2000
800	0,0000	0

